



Criterios para la clasificación de zonas de alta consecuencia en ductos a presión basado en vulnerabilidad hidráulica

Por
Ing. Héctor Gómez Yáñez

Tesis sometida en cumplimiento parcial
a los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Procesos

Director de Tesis:
Dr. Gabriel Soto Cortés
Departamento de Energía, UAM-A

Co-director de Tesis:
Dr. Fabián Rivera Trejo
DAIA, UJAT

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
Posgrado en Ingeniería de Procesos

Criterios para la clasificación de zonas de alta consecuencia en
ductos a presión basado en vulnerabilidad hidráulica

Por
Ing. Héctor Gómez Yáñez

Tesis aprobada para su publicación en cumplimiento parcial
a los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Procesos

Por el Jurado de tesis

Dra. Ismene Libertad Rosales Plasencia.

Presidente

Dr. Jorge Ramírez Muñoz

Secretario

Dr. Rogelio Hernández Suárez

Vocal

Dr. Gabriel Soto Cortés

Vocal



Coordinación de Sistemas Escolares
Sección de Registro Escolar

Fecha : 15/01/2015
Página : 1/1

CONSTANCIA DE PRESENTACION DE EXAMEN DE GRADO

La Universidad Autónoma Metropolitana extiende la presente CONSTANCIA DE PRESENTACION DE EXAMEN DE GRADO de MAESTRO EN INGENIERIA DE PROCESOS del alumno HECTOR GOMEZ YAÑEZ, matrícula 2131800856, quien cumplió con los 202 créditos correspondientes a las unidades de enseñanza aprendizaje del plan de estudio. Con fecha dieciséis de enero del 2015 presentó la DEFENSA de su EXAMEN DE GRADO cuya denominación es:

**Criterios para la clasificación de
zonas de alta consecuencia en
ductos a presión basado en
vulnerabilidad hidráulica.**

Cabe mencionar que la aprobación del Examen de Grado tiene un valor de 0 créditos y el programa consta de 202 créditos.

El jurado del examen ha tenido a bien otorgarle la calificación de:

A P R O B A R

JURADO

Presidenta

DRA. ISMENE LIBERTAD AMERICA ROSALES
PLASCENCIA

Secretario

DR. JORGE RAMIREZ MUÑOZ

Vocal

DR. GABRIEL SOTO CORTES

Vocal

DR. ROGELIO HERNANDEZ SUAREZ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Metropolitana, por darme la oportunidad de adquirir el conocimiento para mi desarrollo profesional y obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Procesos.

A el CONACyT por el apoyo económico brindado en el Posgrado de Ingeniería de Procesos.

A todos y cada uno de mis profesores que me impartieron clase durante mi estancia en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Al Dr. Gabriel Soto por sus observaciones, colaboración, apoyo e invaluable sugerencias durante la preparación de esta tesis.

DEDICATORIA

A mis padres, Jorge y Petra, por ser mi más grande orgullo y ejemplo a seguir,
por sus consejos y sus cuidados en todo momento.

A mi hermana, Delia, por su cariño, paciencia y comprensión.

A Donají por su compañía y apoyo incondicional.

Contenido

<i>Resumen</i>	9
<i>Abstract</i>	9
<i>Advertencia</i>	10
<i>Capítulo 1</i>	11
1. Introducción	11
1.1 Zonas de Alta Consecuencia	13
1.2 Hipótesis	14
1.3 Objetivo	15
1.4 Justificación	15
1.5 Descripción del contenido de la tesis	19
<i>Capítulo 2</i>	20
2. Descripción del caso de estudio	20
2.1 Ubicación y perfil altimétrico del sistema	20
2.2 Variables operativas	23
2.2.1 Propiedades de los productos transportados	23
2.2.2 Especificaciones de la tubería	23
2.2.3 Presiones de operación	24
2.2.4 Especificaciones de operación con fines de simulación	24
<i>Capítulo 3</i>	26
3. Zonas de Alta Consecuencia y Zonas Hidráulicas Vulnerables	26
3.1 Definición	26
3.2 Descripción general de la metodología	27
3.3 ZAC para el caso de estudio	32
3.4 ZHV para el caso de estudio	55
<i>Capítulo 4</i>	59
4. Correspondencia entre ZAC y ZHV	59
4.1 Correspondencia de ZAC y ZHV para pérdida de espesor >50%.	59
4.2 Correspondencia de ZAC con pérdida de espesor >50%. y ZHV en atención inmediata y precaución.	59
4.3 Correspondencia de ZAC con pérdida de espesor <50%. y con bajo riesgo de ZHV	60
<i>Capítulo 5</i>	62
5. Conclusiones y recomendaciones	62
Referencias	64

Índice de figuras

FIGURA 1.1 HIPÓTESIS DE TESIS	16
FIGURA 2.1. UBICACIÓN APROXIMADA DE LAS 12 ESTACIONES DE BOMBEO	21
FIGURA 2.2 DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE TRANSPORTE	22
FIGURA 3.1 SEGMENTO 1 Y UBICACIÓN DE LAS ZAC.....	34

Índice de gráficas

GRÁFICA 3.1 DIAGRAMA DE ENERGÍA. CONDICIÓN DE ESTADO PERMANENTE Y TUBO NUEVO	55
GRÁFICA 3.2 DIAGRAMA DE ENERGÍA. CONDICIÓN DE ESTADO PERMANENTE CON ENVOLVENTE DE PRESIONES SEGURAS.	57
GRÁFICA 3.3 DIAGRAMA DE ENERGÍA. CONDICIÓN DE ESTADO NO PERMANENTE	57

Índice de tablas

TABLA 1.1 CRITERIOS DE ATENCIÓN DESCRITOS EN LA SECCIÓN 3 DEL PAID	12
TABLA 1.2 TABLA DE CLASIFICACIONES DE ZAC SEGÚN EL PAID	13
TABLA 2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	21
TABLA 2.2 ESPECIFICACIONES DE LA TUBERÍA	23
TABLA 2.3 PRESIONES DE OPERACIÓN ENTRE ESTACIONES DE BOMBEO Y REBOMBEO.....	24
TABLA 3.1 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO1.....	33
TABLA 3.2 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO2.....	35
TABLA 3.3 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO3.....	37
TABLA 3.4 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO4.....	39
TABLA 3.5 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO5.....	41
TABLA 3.6 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO6.....	43
TABLA 3.7 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO7.....	45
TABLA 3.8 RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO8.....	47
TABLA 3.9. RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO9.....	49
TABLA 3.10. RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO10.	51
TABLA 3.11. RESULTADOS DE ANÁLISIS CORRESPONDIENTE AL SEGMENTO11.	53
TABLA 3.12 PUNTOS CON CORROSIÓN GALVÁNICA EN EL SISTEMA DE TRASPORTE	55
TABLA 3.13 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE ZHV	58
TABLA 3.14 ZONAS HIDRÁULICAMENTE VULNERABLES	58
TABLA 4.1 CORRESPONDENCIA DE ZAC Y ZHV PARA PÉRDIDA DE ESPESOR >50%.....	59
TABLA 4.2 CORRESPONDENCIA DE ZAC Y ZHV PARA PÉRDIDA DE ESPESOR <50%.....	60
TABLA 4.3 CORRESPONDENCIA DE ZAC PARA PÉRDIDA DE ESPESOR >50% Y BAJA POSIBILIDAD DE FALLA.	60

Acrónimos y símbolos

Símbolo	Descripción
API	American Petroleum Institute
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASNM	Altura Sobre el Nivel del Mar
ASNM	Altura sobre el nivel del mar
CEPIP	Comité de Estudios del Posgrado en Ingeniería de Procesos
DCBI-A	División de Ciencias Básicas e Ingeniería Azcapotzalco
E	Módulo de Young
Est.	Estación de bombeo
MAOP	Máxima presión de operación
MBD	Miles de barriles diarios
MBD	Miles de barriles diarios
MSNM	Metros sobre el nivel del mar
NOM	Norma oficial mexicana
PAID	Plan Maestro de Administración de la Integridad de Ductos
PAID	Plan Administración de la Integridad de Ductos
Pd	Presiones a la descarga
PEMEX	Petróleos Mexicanos
$P_{Máx}$	Presión máxima
PR	PEMEX Refinación
Ps	Presiones a la succión
P_{Segura}	Presión segura
SCC	Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos
SMYS	Esfuerzo máximo permisible
TAD	Terminal de Distribución
UAM-A	Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
UEA	Unidad de Enseñanza Aprendizaje
UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
ZAC	Zonas de Alta Consecuencia
ZES	Zona Extremadamente Sensible
ZHV	Zonas Hidráulicas Vulnerables

Criterios para la clasificación de zonas de alta consecuencia en ductos a presión basado en vulnerabilidad hidráulica

Resumen

La seguridad del transporte de hidrocarburos en ductos está subordinada a normas internacionales como lo es la API 1160-2001. De esta norma se deriva para el contexto nacional la norma oficial mexicana NOM-027-SESH-2010. Estas normativas basan las evaluaciones de seguridad en el sistema de conducción en función de propiedades mecánicas del material con el cual esta manufacturado el ducto pero omiten la inclusión de las variables hidráulicas al realizar dichas evaluaciones. El presente proyecto desarrolla y describe, a través de un caso hipotético, una metodología de cómo realizar evaluaciones de seguridad que combinen ambos criterios, permitiendo priorizar las acciones de mitigación de escenarios de riesgo en los sistemas de conducción.

Abstract

The managing system integrity of pipelines transporting hydrocarbons is regulated by standards like the API 1160-2001. The Mexican government adapted this standard to the Mexican context in 2010 and developed the NOM-027-SESH-2010. Nowadays, in Mexico the application of this rule is based on the pipe's mechanical properties, but not considering hydraulics variables in order to establish levels of risk. This project develops and describes a methodology about how to mix these two approaches focused on risks mitigation on oil pipelines.

Advertencia

La metodología que se desarrolla a lo largo de esta tesis se basa en un caso de estudio fundamentado en un sistema de conducción real. No puede considerarse como un estudio riguroso del sistema referido pues la información utilizada no representa las condiciones de operación reales además sus elementos fueron simplificados. De lo anterior el presente trabajo no puede usarse como referente para un propósito diferente al académico. Sin embargo, la metodología desarrollada es aplicable y extrapolable a sistemas reales.

Capítulo 1

1. Introducción

Cualquier actividad humana necesita energía y ésta se obtiene de diversas formas (eólica, mareomotriz, nuclear, solar y por combustibles fósiles - hidrocarburos-). En particular, la energía generada por hidrocarburos es la que se utiliza en mayor proporción, esto aprovechando los yacimientos petrolíferos -marinos o terrestres- en ambos casos cada uno tiene sus riesgos de extracción, transporte y almacenamiento.

Considerando lo anterior, México se localiza en una geografía privilegiada puesto que en su territorio se encuentran grandes yacimientos de hidrocarburos propiciando una gran extracción de petróleo crudo. La empresa que se dedica a la gestión de las actividades relacionadas con el petróleo y sus derivados, es Petróleos Mexicanos (PEMEX), en este rubro, PEMEX es la empresa más grande de Latinoamérica y emplea a 184,090 trabajadores en sus actividades diarias (Petróleos Mexicanos, 2011).

PEMEX se divide en cuatro organismos subsidiarios: 1) PEMEX Exploración y Producción, 2) PEMEX Refinación, 3) PEMEX Petroquímica, 4) PEMEX Gas y Petroquímica Básica. Cada una de estas subsidiarias cumple con diferentes objetivos y tiene actividades propias (Petróleos Mexicanos, 2013).

PEMEX Refinación (PR) es la subsidiaria encargada del transporte, almacenamiento y distribución de los hidrocarburos crudos y refinados que se producen en el país. Uno de los objetivos fundamentales de PR es garantizar la seguridad de sus instalaciones (ductos) y de su personal, en armonía con la comunidad y el medio ambiente. Cabe señalar que esta conciencia por la preservación está sujeta a una obligatoriedad que tiene como antecedente la instauración en 2001 de la norma API 1160-2001 (API, 2001) en Estados Unidos y que fue retomada en el contexto internacional. Dicha norma armoniza a su vez, la normatividad existente alrededor de la seguridad en el transporte de sustancias peligrosas, a través de una estructura denominada Gestión de la Integridad de Ductos. En México, la API-1160 derivó en la norma oficial mexicana NOM-027-SESH-2010 "Administración de la integridad de ductos de recolección y transporte de hidrocarburos" (Secretaría de Energía, 2010).

Las normas antes referidas distan mucho de ser una guía pormenorizada que establezca los pasos a seguir a fin de mitigar los riesgos en el transporte. En realidad solamente bosquejan una metodología con enfoque sistémico y multidisciplinario circunscrito en un modelo de mejora continua. Las normas enuncian cada una de las etapas de este ciclo y obligan al propietario del

sistema a implementar dichas disposiciones a través de un plan de acciones denominado Plan de Administración de la Integridad del Ducto (PAID).

Dada la magnitud de este requerimiento para una empresa como PR que tiene a su cargo decenas de sistemas de conducción con miles de kilómetros de longitud, hubo que acordar algunos aspectos fundamentales o de carácter general para que cada sector del país fuera capaz de desarrollar los PAID particulares a cada ducto, tarea que actualmente se encuentra en curso. Este acuerdo general se denominó Plan Maestro de la Gestión de la Integridad en Ductos o simplemente PAID Maestro (PAID, 2010).

En términos muy simples se puede decir que el PAID establece la manera en que deben identificarse los riesgos potenciales que afectan a un sistema de conducción, se cuantificarán las probabilidades de ocurrencia, de las consecuencias y con ello la ponderación (priorización) de las medidas de mitigación, en la sección 7 del PAID (ver Anexo 1) se contempla la atención al ducto en caso de corrosión y abolladuras. La presente tesis aborda sólo el caso de corrosión, se consideran las indicaciones de este apartado el cual señala la priorización de mantenimiento que se le tiene que dar al ducto en función del segmento afectado por corrosión y se clasifica en dos criterios de atención (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Criterios de atención descritos en la sección 3 del PAID

Criterio de atención al segmento afectado según sección Núm. 3 del PAID	Profundidad de corrosión [%]
Tiempo de reparación menor a 5 días	Mayor al 80% (<80%)
Tiempo de reparación menor a 180 días	Mayor al 50% (<50%)
Sin recomendación de reparación	Menor al 50% (>50%)

Para poder definir los criterios anteriores primero es necesario identificar las Zonas de Alta Consecuencia (ZAC), para lo cual la sección 2 del PAID contiene la definición y los criterios para clasificarlas y los cuales se describen a continuación.

1.1 Zonas de Alta Consecuencia

Las Zonas de Alta Consecuencia, son un elemento sumamente importante para preservar la integridad del ducto, esta es una delimitación y caracterización de las zonas donde las consecuencias o efectos de un derrame o fuga de un líquido peligroso, pueden causar daños significativos a la población y áreas sensibles.

Para identificar las ZAC se comienza segmentando el sistema de ductos; el PAID en su sección 2 describe cuatro criterios para la segmentación del ducto:

- 1) Entre trampas de envío/recibo de equipo instrumentado.
- 2) Entre válvulas de seccionamiento.
- 3) Por cambio de atributos.
- 4) Por necesidades del usuario.

Seguido de los criterios de la segmentación, se identifican las clasificaciones de localización para las ZAC, los criterios para la identificación de la ZAC se describen a continuación. (PAID, 2010) Ver Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Tabla de clasificaciones de ZAC según el PAID

Localización	Descripción
Clase 1	<ul style="list-style-type: none"> Área ubicada lejos de las playas (mar adentro). Área en donde se encuentran 10 ó menos edificaciones destinadas para la ocupación humana.
Clase 2	<ul style="list-style-type: none"> Área en donde se encuentran 11 a 45 edificaciones destinadas para la ocupación humana.
Clase 3	<ul style="list-style-type: none"> Área en donde se encuentran 46 ó más edificaciones destinadas para la ocupación humana. Área a una distancia menor de 91 metros de algún ducto de transporte de hidrocarburos. Edificación que sea frecuentada por 20 o más personas en al menos 5 días a la semana.
Clase 4	<ul style="list-style-type: none"> Área en donde prevalecen edificaciones destinadas para la ocupación humana de 4 ó más niveles.
Ducto que cruza perpendicularmente un río	<ul style="list-style-type: none"> La longitud de ZAC es el ancho del cruce del río sumado a la longitud del radio de un círculo que señala la afectación en la zona.

Localización	Descripción
Zonas Extremadamente Sensibles	<ul style="list-style-type: none"> Estas zonas contienen agua potable y/o recursos ecológicos que son susceptibles a daños irreversibles o de larga duración.

Una vez que se ha descrito como clasificar las ZAC según el PAID es necesario calcular la longitud del segmento afectado y este depende de la clasificación que se le asigna a cada ZAC, estos cálculos están contenidos en el apéndice A3 del PAID (PAID, 2010). Para esta tesis los hemos descrito en la sección 3.2 y la información propia del PAID se ha anexado en el Apéndice 2 al final de este manuscrito.

Actualmente las legislaciones no incorporan el análisis hidráulico, solo se limitan a generar escenarios de riesgo en función de variables mecánicas en el ductos, estas variables mecánicas referentes a abolladuras o a pérdidas de material por concepto de corrosión.

En lo que respecta a la tesis que se sustenta en este manuscrito, se pretende utilizar un caso de estudio para ejemplificar una metodología capaz de enriquecer los criterios de clasificación de las ZAC (Tabla 1.2) incluyendo las variables dinámicas que surgen de un análisis de seguridad hidráulica. Lo anterior pretende mostrar que inclusive la normatividad aplicable tiene oportunidades de mejora si esta incorpora el concepto de Zonas Hidráulicas Vulnerables (ZHV).

Cabe resaltar que la metodología desarrollada a lo largo de este manuscrito puede ser aplicable a otros sistemas de conducción. No se limita al caso de estudio analizado y se puede extrapolar a otros sistemas de conducción de hidrocarburos. Este tema de tesis es innovador, puesto que al momento de redactar esta tesis, no se tienen evidencias de que se esté utilizando una metodología similar para evaluar sistemas de conducción de crudo. Esta tesis pretende incluir al actual análisis que se utiliza en los sistemas de transporte el análisis hidráulico. Para ello se presenta la hipótesis de la tesis en el apartado siguiente.

1.2 Hipótesis

En adición a los criterios de clasificación de las ZAC con base en el nivel de afectación directa a las vidas humanas y al medio ambiente, pueden establecerse otros criterios de priorización en función de la vulnerabilidad hidráulica.

1.3 Objetivo

El objetivo de la tesis es desarrollar criterios de priorización en la gestión de la integridad de ductos y desarrollar medidas de mitigación de riesgos en ZAC en función de su vulnerabilidad hidráulica. También en el proyecto de tesis se pretende demostrar que la actual normatividad no contempla las variables hidráulicas, y que estas podrían sumarse a las Zonas de Alta Consecuencia para establecer criterios de priorización en la gestión de la integridad de ductos.

Para realizar este ejercicio, se propone analizar la operación de un caso de estudio, en condiciones de estado permanente y transitorio, con el objetivo de identificar las ZAC y las ZHV. Una vez realizado el análisis, se propondrán criterios de priorización para desarrollar acciones de mitigación de riesgo considerando criterios de la vulnerabilidad hidráulica.

1.4 Justificación

Esta tesis pretende demostrar a través del análisis al caso de estudio, que la concepción de la normatividad actual contenida en el PAID maestro y los PAID particulares para cada sistema de transporte, podría estar incompleta debido a que:

1. Los riesgos inherentes a un ducto no necesariamente se encuentran ligados a las ZAC.
2. Usualmente las ZAC coinciden con las ZHV, lo cual potencia la probabilidad de falla en un ducto.

La omisión referida en este último párrafo podría ser de graves consecuencias si se considera a las ZHV como aquellas donde los niveles de presión de operación exceden o se acercan peligrosamente a los niveles presión segura en términos de la normatividad vigente (Soto y Guaycochea, 2007). Las ZHV toman en cuenta la dinámica de las variables del proceso de transporte al considerar fenómenos transitorios como cavitación y el golpe de ariete.

La cavitación es fenómeno hidráulico que en ocasiones está involucrado con el golpe de ariete. En la cavitación la presión del ducto decrece hasta alcanzar un cambio de fase (presentándose burbujas de gas). Después de generarse la cavitación se tienen dos fases en la tubería lo cual aumenta peligrosamente la presión a tal grado que se pudiera presentar una ruptura (Záruba, 1993).

La presión de un líquido en un conducto y su descarga son interdependientes. Cada cambio en la descarga induce un cambio correspondiente en la presión y viceversa. Los cambios de presión causados por esta dependencia se llaman golpe de ariete (water hammer). Este término también se aplica en casos donde el líquido no es necesariamente agua. Los cambios de presión en el golpe de ariete pueden ser insignificantes, pero podrían también ser grandes, a tal grado que en ocasiones se llega a la ruptura de una línea de tubería. (Záruba, 1993).

Las causas del golpe de ariete son particularmente dos, la primera se debe a un cierre alguna válvula y el segundo es la salida de operación de alguna estación de bombeo, ambas de manera abrupta o intempestiva. Cuando se tiene un fenómeno de este tipo también se le conoce como estado dinámico.

Ahora en este proyecto de tesis se propone identificar, en los escenarios antes descritos, la correspondencia entre las ZAC y las ZHV a fin de emitir criterios sobre la seguridad del sistema (ver Figura 1.2).

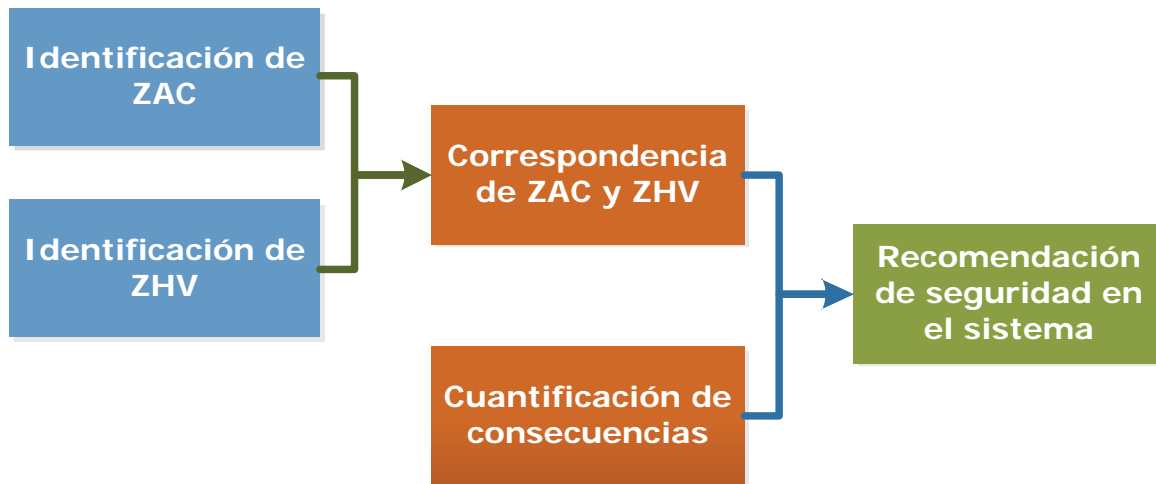


Figura 1.1 Hipótesis de tesis

A continuación se presenta el siguiente diagrama de energía mismo que describe las variables hidráulicas a las cuales está sujeto un sistema de ductos. También se representan las ZAC. Lo que se pretende por lo tanto, es empatar las ZAC con las ZHV esto se describe a continuación (ver Figura 1.2).

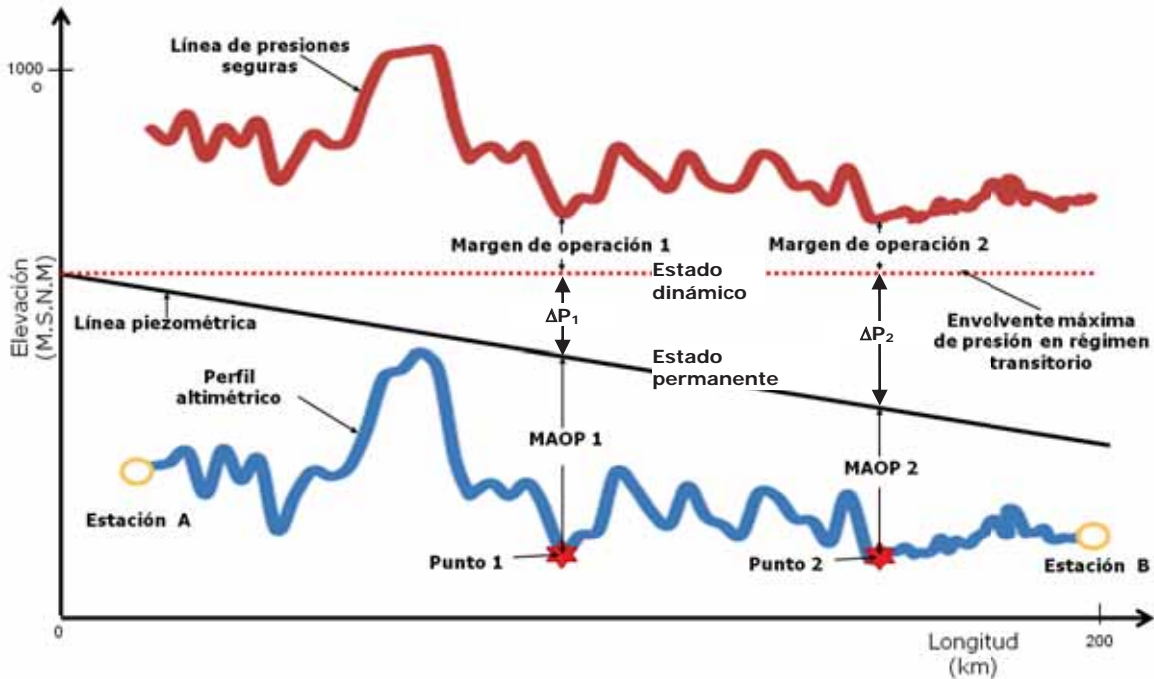


Figura 1.2 Diagrama de energía.

El diagrama de energía (Figura 1.2) muestra dos posibles escenarios:

1. Estado permanente, este describe la operación normal del sistema de conducción.
2. Estado dinámico, en el cual se presentan los fenómenos de golpe de ariete y cavitación (descritos en párrafos anteriores).

En el diagrama de energía se ejemplifica un segmento de un sistema de ductos con dos estaciones de bombeo (Estación A y Estación B). La línea azul representa el perfil altimétrico en función de la longitud del sistema. La línea en guinda (línea de presiones seguras) muestra los daños inherentes al paso del tiempo como podrían ser corrosión interna o corrosión externa. La línea piezométrica representa la presión inicial (succión) y la presión final (descarga). En el diagrama se señalan dos puntos (Punto 1 y Punto 2), que corresponderían a un cruce en ríos, en cuanto a las ZAC y son clasificados como "ductos que cruzan perpendicularmente un río", la longitud de los cruces de río son de ancho y profundidad semejante, con la misma probabilidad de falla según datos históricos, las consecuencias son comparables, por lo tanto el PAID indicaría que los dos puntos requieren el mismo nivel de atención. Sin embargo, la inclusión de variables hidráulicas podría dar elementos adicionales a considerar. De la Figura 1.2 considere que:

$$\begin{aligned}
 MAOP\ 1 &> MAOP\ 2 \\
 \Delta P_1 &< \Delta P_2 \\
 \text{Margen de operación 1} &> \text{Margen de operación 2}
 \end{aligned}$$

Considerando la máxima presión de operación en estado permanente (MAOP) se observa que el punto 1 opera a mayor presión interna (debido a que tiene una mayor presión ejercida por una bomba) con un margen de presión segura menor que el punto 2 (cabe recordar que al existir fricción la presión disminuye del punto 1 al punto 2). Es decir que en condiciones de estado permanente, para este ejemplo, el punto 1 es prioritario respecto al punto 2. Sin embargo, si es factible un escenario de golpe de ariete como el que se ejemplifica en la Figura 1.2, deberá considerar que el nivel de sobrepresión ΔP_2 es significativamente mayor que el correspondiente al punto 1 lo que genera un margen de operación segura menor. Bajo este escenario el punto 2 es prioritario sobre el punto 1. Aunque este es un ejemplo hipotético, es claro que al incorporar variables hidráulicas, la clasificación de las ZAC punto 1 y ZAC punto 2 puede ser equivalente pero el nivel de riesgo y por ende la prioridad en la atención difiere en función del escenario de operación.

Para la elaboración de los diagramas de energía contenidos en esta tesis fue necesario utilizar el software llamado Origin y los datos necesarios para calcular los diagramas de energía en estado permanente y estado transitorio son los siguientes:

Envolvente de golpe de ariete:	Línea piezométrica:	Línea de presiones segura:
<ul style="list-style-type: none"> • Nivel de presión por golpe de ariete • Sobrepresión por paro súbito según eficiencia • Presión de descarga • Eficiencia al relevo • Sobrepresión por paro súbito ΔH (Ec. Joukowski) • Celeridad de onda promedio en el tramo • Modulo de elasticidad cúbica del líquido • Gravedad específica • Modulo de elasticidad 	<ul style="list-style-type: none"> • MAOP en el punto inicial • MAOP en el punto final • Gravedad específica • Viscosidad • Perdidas por fricción por unidad de longitud • Rugosidad de calibración • Diámetro interior de la tubería • Velocidad media del flujo 	<ul style="list-style-type: none"> • Presión Segura • Espesor nominal • Presión interna de diseño • Esfuerzo específico mínimo de efluencia • Factor de diseño • Longitud de la corrosión

1.5 Descripción del contenido de la tesis

Este manuscrito está dividido en 5 capítulos. En el primer capítulo se aborda la el contexto en cuanto al transporte de hidrocarburos por ductos, se describe brevemente el contexto nacional (República Mexicana) de cómo se administra el área energética concerniente a petróleo. Se describe el contexto normativo internacional para dar paso a las regulaciones aplicables en territorio mexicano. Se describe como se evalúan los actuales sistemas de conducción de hidrocarburos mediante al PAID y se introduce el concepto de ZAC. Después de ello se planteó la hipótesis, resaltando una omisión en la actual normativa al no incluir las variables hidráulicas.

En el capítulo 2 se presenta el caso de estudio, se describen los aspectos físicos como el material con el que es manufacturado el ducto, las estaciones de bombeo y/ rebombeo (incluyendo las presiones de operación de cada una de ellas), las propiedades físicas del aceite transportado, el volumen que aceite transportado, se ilustra la ubicación y diagrama de proceso del diagrama de proceso del sistema de conducción. Para este caso de estudio se tomaron ciertas consideraciones las cuales se describen el Capítulo 3 sección 3.2.

El capítulo 3 comienza con la descripción de las ZHV y se describe de una manera profunda las ZAC. Se describe la metodología que se ha realizado para calcular las ZAC, las cuales son siguiendo el PAID. Se presentan los 11 segmentos en los cuales se ha dividido el sistema de conducción y también se presentan los resultados de cada una de las ZAC. En Caso de ZHV se describen los cálculos para la obtención de presiones y después de definen los criterios de priorización en función de la vulnerabilidad hidráulica.

El capítulo 4 contiene los resultados de la simulación del sistema de transporte, en el cual se identifican todas las ZHV y se incluye un análisis en el cual se empatan con las ZAC. Estos resultados, mediante la demostración, tratan de convencer al lector de la omisión del PAID en cuanto a la vulnerabilidad hidráulica. Es importante resaltar que también se incluyen las ZAC que no presentan riesgo hidráulico, este manuscrito pretende complementar la metodología del PAID.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones recomendaciones y recomendaciones generadas a partir del análisis de resultados del sistema de transporte. Este capítulo comienza describiendo las ZAC que concuerdan con las ZHV, luego las ZAC que no presentan riesgo según el PAID pero que si contienen riesgo hidráulico, las ZAC que según el PAID merecen atención y que no tienen ZHV y por último las recomendaciones de cómo priorizar las acciones de mitigación en función de las variables hidráulicas.

Capítulo 2

2. Descripción del caso de estudio

Se propone analizar un oleoducto (sistema de transporte de petróleo crudo) con una longitud de 1,179.185 km. Este oleoducto tiene una importancia estratégica, puesto que conecta la zona de extracción en el sur de la Republica Mexicana (Veracruz) con una importante refinería en el norte de la Republica Mexicana (Tamaulipas). Por este sistema de transporte fluyen diariamente 560,000 barriles de petróleo crudo al día (MBD), por la línea 1 se transportan 360 MBD y por la línea 2 (línea de estudio) se transportan 200 MBD.

El oleoducto está compuesto por dos líneas que corren paralelas compartiendo el mismo derecho de vía; ambas tienen un perfil altimétrico muy similar pues cruzan los mismos accidentes geográficos, pero presentan puntos vulnerables diferentes como es en el caso de corrosión. Para este trabajo de tesis se trabajó usando las características generales de la "línea 2" del sistema.

2.1 Ubicación y perfil altimétrico del sistema

El oleoducto bajo análisis recorre la parte oriental de la Republica Mexicana, atravesando los estados de Veracruz, Tamaulipas y Nuevo León. Cabe señalar que el oleoducto tiene un perfil altimétrico sinuoso, esto es debido a la compleja orografía de la sierra madre oriental. Con elevaciones que van de los 0 metros sobre el nivel del mar (MSNM) hasta 464 MSNM.

El ducto cruza más de 23 cuerpos de agua: desde pequeños arroyos con claros de 10 m, hasta ríos caudalosos y navegables como lo son el río Coatzacoalcos con un claro de 500 m o el río Papaloapan con un ancho de cruce de 460 m.

La demografía aledaña a los derechos de vía es variada. El oleoducto atraviesa pequeñas comunidades de no más de 20 habitantes y una longitud de ZAC de 500 m hasta grandes ciudades por ejemplo ZAC Poza Rica, Veracruz que tiene involucrados a los largo de la ZAC mas de 4500 habitantes y una longitud de afectación ZAC de más 1700 m o también la ZAC Tampico, Tamaulipas en la cual se tienen registros de más de 3000 habitantes con una longitud de afectación de 9562 m.

El sistema de transporte se compone de 12 estaciones de bombeo y rebombeo (ver Figura 2.1). Este sistema de conducción presenta una alta probabilidad de generar un transitorio hidráulico en las siguientes condiciones (solo por mencionar algunas):

- Puesta en operación de sistema de conducción.
- Apertura de válvulas.
- Cierre de válvulas.
- Salida de operación de alguna estación de bombeo.

La línea 2 tiene un diámetro nominal de 24 pulg., con una capacidad de transporte de 200 MBD (Tabla 2.1) y en esta línea 2 se encuentran instaladas 63 válvulas (Figura 2.2).

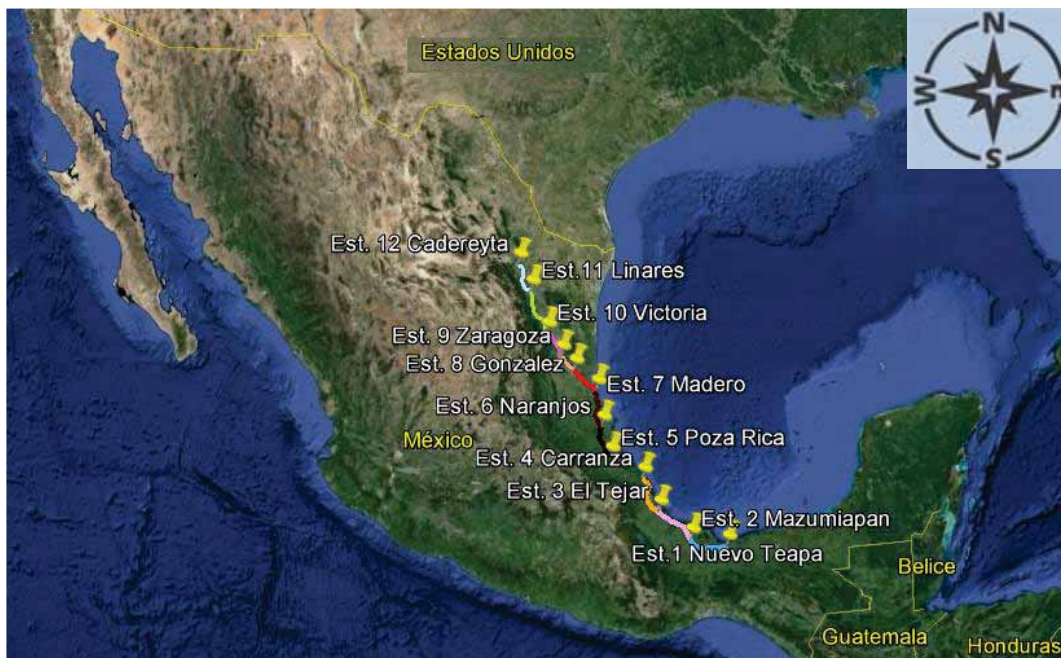


Figura 2.1. Ubicación aproximada de las 12 estaciones de bombeo

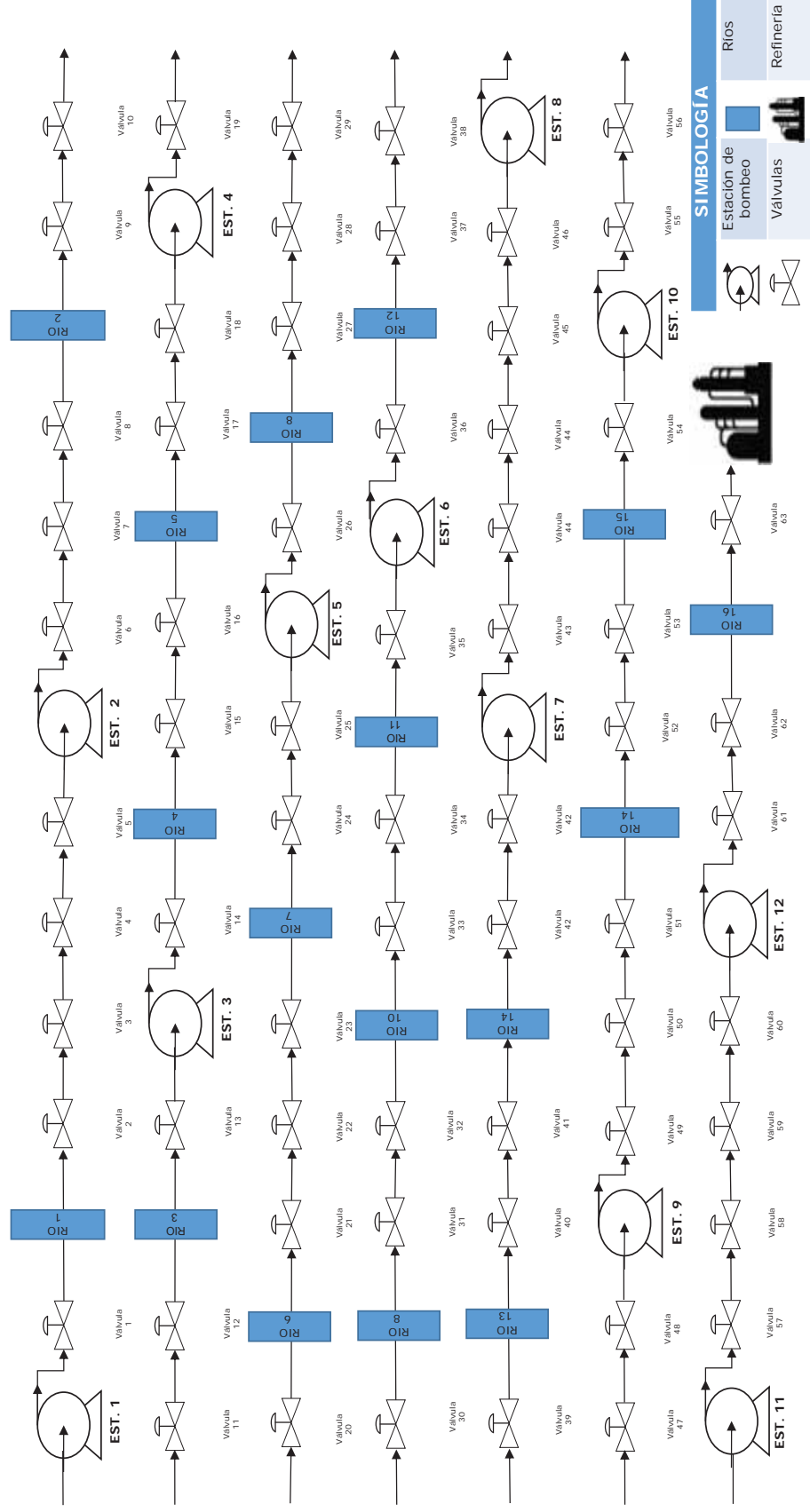
La anterior Figura 2.1 muestra la ubicación geográfica del ducto a lo largo de su recorrido, este trazo fue construido a partir de la información de la Tabla 2.3, la cual también incluye el perfil altimétrico de cada estación. Cabe la pena señalar que los datos usados, aproximan el perfil altimétrico real aunque no pueden considerarse exactos. El fin que persigue esta información es únicamente de carácter académico.

El sistema de conducción inicia en el sur de la Republica Mexicana (Nuevo Teapa, Veracruz) y termina en el norte en la refinería de Cd. Madero, Tamaulipas. Para realizar el trazo de este sistema de conducción, primero se ubicaron las estaciones de bombeo y rebombeo (Tabla 2.3) para luego seguir el derecho de vía visible entre ellas, todo esto en la base de datos de Google Earth. En la siguiente Tabla 2.1 se describen las condiciones del sistema de transporte.

Tabla 2.1 Descripción del sistema

Longitud total del sistema de ductos(Km)	1,179
Diámetro nominal de la tubería (pulg.)	24
Material de la tubería	Acero al carbono
Número de estaciones de bombeo y rebombeo	12
Capacidad de transporte(MBD)	200
Número de válvulas	63

Figura 2.2 Diagrama unifilar del sistema de conducción.



2.2 Variables operativas

2.2.1 Propiedades de los productos transportados

El fluido a transportar es petróleo crudo, del cual se tienen dos variedades:

1. Crudo Maya, este fluido se clasifica como petróleo crudo pesado, con una densidad de 22.0 grados API y 3.3% de azufre en peso.
2. Crudo Istmo, el cual se clasifica como ligero con una densidad de 33.6 grados API y 1.6% de azufre en peso (IMP, 2013).

2.2.2 Especificaciones de la tubería

Esta línea 2 a diferencia de la que es paralela a ella (línea 1), tiene un diámetro continuo de 24 pulg. y no contiene ningún loop (Un loop es un arreglo de tuberías en paralelo, el cual es utilizado para dividir el flujo del líquido y disminuir la presión en el segmento de tuberías). Se detallan las propiedades referentes a la tubería (ver Tabla 2.2). Las cuales son utilizadas en el cálculo de las presiones bajo condiciones normales de operación y las generadas por un fenómeno transitorio.

Tabla 2.2 Especificaciones de la tubería

Tipo de acero	API 5L (X52)
Tensión de Fluencia (SMYS)	52000 psi
Diámetro Exterior (D)	24 pulg.
Módulo de Young (E)	206000 psi
Espesor (t_w)	0.25 in
Factor de juntas (Fd)	0.72
Eficiencia al relevo	0.80
Flujo	200 MBD

2.2.3 Presiones de operación

En la siguiente Tabla 2.3 se especifican las presiones de operación de las 12 estaciones de bombeo y rebombeo que conforman el sistema de transporte. Los datos contenidos en la Tabla 2.3 (datos de presión de succión y presión de descarga) fueron proporcionados por el propietario del sistema de conducción y son la base para la simulación del proceso de transporte (en la sección 3.2 se describe la metodología de cálculo).

Tabla 2.3 Presiones de operación entre estaciones de bombeo y rebombeo.

#	Estación	Elevación [msnm]	Posición [km]	Ps* [kg/cm ²]	Pd* [kg/cm ²]
1.	Nuevo Teapa	34.05	0+000	0	46.13
2.	Mazumiapan	42.20	120+470	6.00	45.84
3.	El Tejar	10.52	250+975	6.00	46.99
4.	Carranza	55.07	364+106	6.00	45.60
5.	Poza Rica	58.72	484+200	6.00	48.33
6.	Naranjos	51.60	593+200	13.00	36.60
7.	Madero	10.11	709+200	3.00	53.95
8.	González	97.00	800+700	17.00	34.71
9.	Zaragoza	190.00	861+500	7.00	46.11
10.	Victoria	295.00	945+200	9.00	54.85
11.	Linares	363.00	1080+200	4.00	34.36
12.	Cadereyta	326.00	1179+190	4.00	0

* Ps Presión a la succión

Pd Presión a la descarga

2.2.4 Especificaciones de operación con fines de simulación

Las simplificaciones utilizadas en el presente proyecto de tesis se describen en tres partes.

1. La correspondiente al trazo del ducto.
 - a) Mediante el uso del software Google Earth se siguieron los derechos de vía visible y sobre ellos se ha idealizado el trazo del ducto en función de las estaciones de bombeo y rebombeo.
 - b) La longitud total del ducto corresponde a la vista horizontal del terreno que atraviesa sistema de transporte.

2. La correspondiente el cálculo de ZAC.
 - a) El cruce de ríos por los cuales atraviesa el ducto se consideró perpendicular en todos los casos con fin de calcular la longitud de la zona afectada de acuerdo con la norma aplicable.
3. La correspondiente al cálculo de ZHV.
 - a) El fluido (petróleo crudo) transportado en el sistema de ductos es unifásico. Solo se tiene la fase de aceite. No se contempla que el fluido sea fase gas y fase líquida.
 - b) Aunque se genera una onda negativa, únicamente se contempla onda positiva en el fenómeno de golpe de ariete, al realizar esta consideración se evita tener involucrada la cavitación. Esto se realiza con fines de simplificar la simulación del proceso de conducción.
 - c) El Porcentaje de eficiencia de relevo debido al trabajo del equipo de bombeo fue simulado con un valor de 0.80.

Capítulo 3

3. Zonas de Alta Consecuencia y Zonas Hidráulicas Vulnerables

3.1 Definición

En el presente capítulo se describirá la metodología aplicada al caso de estudio, con la finalidad de incorporar criterios hidráulicos a la clasificación de ZAC prevista en el PAID. Primero se comenzará describiendo que son las ZAC y las ZHV, para después aplicar la metodología actual contenida en el PAID. En una segunda etapa, se definirán las ZHV afin de encontrar elementos que permitan contribuir a la clasificación de las ZAC y a la priorización de medidas de mitigación.

Zonas de Alta Consecuencia

Las Zonas de Alta Consecuencia (ZAC) son aquellas áreas pobladas o ecológicamente sensibles a lo largo de la ruta del ducto que en caso de una fuga o derrame, pueden ser afectadas, teniendo graves consecuencias para la seguridad del público y medio ambiente (PAID, 2010). Las ZAC se clasifican atendiendo al número de habitantes contenidos en cierta área específica, en caso de cruce de río se clasifican de acuerdo al ancho del cruce de río y en caso de zonas sensibles se clasifican por el área a la cual corre paralelamente el ducto. La clasificación general de las ZAC se presentó en la Tabla 1.2.

Zonas Hidráulicas Vulnerables

Estas zonas son definidas como puntos a lo largo de la longitud del sistema de ductos donde existe una alta probabilidad de pérdida en la integridad del ducto (ruptura). Esta probabilidad de ruptura es debida a una sobrepresión que puede ser causada por el cierre brusco o apertura brusca de alguna válvula, también se puede generar una sobrepresión cuando una estación de bombeo o rebombeo sale repentinamente de operación, estos factores generan el fenómeno conocido como golpe de ariete (el cual fue descrito en la sección 1.4).

3.2 Descripción general de la metodología

Zonas de Alta Consecuencia

Esta clasificación sigue la metodología descrita en el PAID. Se desarrollan los cálculos para las clasificaciones siguiendo los ejemplos contenidos en el apéndice A.3 del PAID (PAID, 2010).

- a) La segmentación del sistema de ductos fue con base a la localización -de válvulas de seccionamiento (Bombas y válvulas en estación de bombeo), esto aprovechando que se tiene la ubicación precisa del equipo de bombeo conectado al ductos entre estaciones de bombeo o rebombeo, el cual esta descrito en el PAID (PAID, 2010). El sistema de ductos bajo análisis contiene 12 estaciones de bombeo y/o rebombeo, al segmentarlo de acuerdo al anterior criterio resultan 11 segmentos. A continuación se describen las ZAC, primero sus datos en tablas y luego se utiliza una figura ubicar el segmento geográficamente.
- b) El número de habitantes y el número de viviendas fue consultado en la base de datos del INEGI (INEGI, 2014). Para obtener la longitud de población se utilizó el software Google Earth, el cual tiene una herramienta llamada regla y esta fue utilizada para medir el inicio y el final de cada población aledaña al ducto. En el caso de longitud de cruce de río se utilizó de igual forma la herramienta de regla del Google Earth para la medición del cruce.
- c) Cruce de ríos. Es cuando el ducto cruza perpendicularmente al río y el segmento afectado es la distancia de cruce de río más dos círculos cuyo radio es la distancia máxima de afectación desde ambos márgenes del río.

$$\text{Segmento afectado}_{\text{Río}} = 300 \text{ m} + L_{\text{ZAC CR}} + 300 \text{ m} \quad (3.1)$$

Donde:

$L_{\text{ZAC CR}}$ = Longitud de cruce de río.

- d) Zonas de Alta Consecuencia. Es la localización zonas pobladas. Esta identificación incluye las clasificaciones 1, 2, 3 y 4 para ductos que transportan hidrocarburos líquidos. El segmento afectado es la longitud de la población aledaña al ducto más dos círculos cuyo radio es la distancia máxima de afectación.

$$\text{Segmento afectado}_{\text{Población}} = 300 \text{ m} + L_{\text{ZAC P}} + 300 \text{ m} \quad (3.2)$$

Donde:

$L_{\text{ZAC CR}}$: Longitud de segmento de población cercano al ducto.

Para las clasificaciones 1, 2, 3, y 4 se sigue la descripción de acuerdo a las edificaciones cercanas al ducto, esto se describió en la Tabla 1.2.

- e) Zonas Extremadamente Sensibles (ZES). El segmento afectado es la distancia que corre paralelamente el ducto más la distancia de dos círculos en ambos extremos del límite de la zona sensible, estos círculos tienen un radio que es el límite de afectación máxima.

$$\text{Segmento afectado}_{ZES} = 240 \text{ m} + \text{longitud}_{ZES} + 240 \text{ m} \quad (3.3)$$

Donde:

$L_{ZAC \text{ ZES}}$: Longitud de zona extremadamente sensible.

Zonas Hidráulicas Vulnerables

Basado en un proceso de simulación de las condiciones de operación en estado permanente y transitorio (Soto & Guaycochea, 2007).

- a) MAOP. Es el acrónimo de Maximum Allowed Operation Pressure (presión de operación máxima permitida). Esta presión se utiliza para determinar el perfil piezométrico. La MAOP se calcula tomando en cuenta las presiones de succión y descarga entre estaciones y además va relacionada con las pérdidas por fricción.

$$P_1 = P_2 + \Delta L S_f + \frac{s \Delta Z}{10} \quad (3.4)$$

Donde:

P_1 : MAOP en el punto inicial [kg/cm^2]

P_2 : MAOP en el punto final [kg/cm^2]

ΔL : Longitud del segmento [km]

S_f : Pérdidas de energía por unidad de longitud [$\text{kg}/\text{cm}^2/\text{km}$]

s : Gravedad específica de la mezcla [-]

ΔZ : Es el valor de A.S.N.M en el punto final menos la ASNM en el punto inicial [m]

*Nota. 1/10 es factor de conversión de metros de columna de agua a Kg/cm^2

- b) Pérdidas de energía

$$\frac{hf}{L} = 0.202 \frac{Q^2 s}{g D^5 10} \left\{ \log \left[0.27 \frac{\varepsilon}{D} + 4.62 \left(\frac{v D}{Q} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad (3.5)$$

Esta ecuación es válida cuando

$$10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2} \quad \text{y} \quad 5000 < Re < 10^8$$

Donde:

hf/L : Pérdidas de energía por unidad de longitud [$\text{kg/cm}^2/\text{km}$]

V : Velocidad media del flujo [m/s]

Q : Gasto volumétrico [m^3/s]

ε : Rugosidad de la tubería [-]

ν : Viscosidad cinemática de la mezcla [m^2/s]

s : Gravedad específica de la mezcla [-]

L : Longitud del segmento de tubería [km]

g : Fuerza de gravedad [m/s^2]

D : Diámetro de la tubería [m]

Re : Número de Reynolds [-]

- c) Sobrepresión. Esta es una presión dinámica que es debida al fenómeno golpe de ariete. Se ha calculado para identificar cual es la onda máxima positiva entre cada segmento del sistema de ductos. Esta sobrepresión se representa en el diagrama piezométrico.

$$P_{M\acute{a}x} = (\Delta H - ASNM) * \frac{S}{10} \quad (3.7)$$

Donde:

$P_{M\acute{a}x}$: Sobrepresión [kg/cm^2]

ΔH : Nivel de presión de golpe de ariete [m]

S : Gravedad específica de la mezcla [-]

$ASNM$: Es la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra el segmento de tubería [m]

*Nota. 1/10 es factor de conversión de metros de columna de agua a Kg/cm^2

- d) Nivel de presión de golpe de ariete

$$\Delta H = \frac{(P_d)(10)}{s} + MSNM + \Delta p_{\text{paro s\acute{u}bito}} \quad (3.8)$$

Donde:

P_d : Presión de relevo a la descarga [kg/cm^2]

s : Gravedad específica de la mezcla [-]

$MSNM$: Metros sobre nivel del mar [m]

$\Delta p_{\text{paro s\acute{u}bito}}$: Sobrepresión de paro s\acute{u}bito seg\acute{u}n eficiencia [m]

*Nota. 10 es factor de conversión de Kg/cm^2 a metros de columna de agua

$$\Delta p_{\text{paro s\acute{u}bito}} = \Delta H_{\text{Joukowsky}}(1 - E_r) \quad (3.9)$$

Donde:

$\Delta p_{\text{paro subito}}$: Sobrepresión de paro súbito según eficiencia[m]

$\Delta H_{\text{Joukowsky}}$: Ecuación de Joukowsky para sobrepresión en cierre brusco [m]

E_r : Eficiencia al relevo [-]

*Nota: Se utilizó la Ec. Joukowsky porque es una primera forma de describir la sobrepresión debida a un transitorio hidráulico. Esta metodología podría robustecerse aplicando otras ecuaciones un más complejas. Pero para los fines de simulación que persigue este documento resulta una buena aproximación el uso de la Ec. Joukowsky.

$$\Delta H_{\text{Joukowsky}} = V \frac{a}{g} \quad (3.10)$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo [m/s]

a : Celeridad [m/s]

g : Fuerza de gravedad [m/s²]

Para el factor a :

$$a = \sqrt{\frac{\frac{\beta}{\rho}}{1 + \frac{\beta D}{Ee}}} \quad (3.11)$$

Donde:

β : Módulo de elasticidad cúbica del líquido [Mpa]

ρ : Densidad del líquido [kg/m³]

D : Diámetro de la tubería [m]

E : Modulo de elasticidad [Mpa]

e : Espesor de la tubería [m]

a : Celeridad [m/s]

- e) Presión Segura. La Presión Segura se ha calculado para trazar el perfil de Presión interna de diseño en el diagrama de energía, el cual nos muestra la máxima presión a la que puede operar el sistema de ductos, sin presentar un riesgo de ruptura. Para determinar las presiones internas de diseño y presiones seguras de operación se sigue la metodología descrita en Soto y Guaycochea (2007), la cual describe los cálculos de presión interna de diseño y presión segura, considerando la disminución del espesor en la tubería por corrosión interna y externa. Cabe resaltar que cuando el tubo es nuevo la presión interna de diseño es igual a la Presión segura.

$$P = \frac{2 (SYMS)(t)(Fd)}{D} \quad (3.12)$$

Donde:

P : Presión interna de diseño [kg/cm^2]

t : Espesor [in]

D : Diámetro externo [in]

Fd : Factor de diseño [-]

$SYMS$: Esfuerzo específico mínimo de fluencia [kg/cm^2]

Los cálculos de la Presión Segura se basan en la norma ASME B31.G (ASME B31.8s, 2006) según los criterios de Soto y Guaycochea (2007):

$$A = \frac{0.873L}{\sqrt{Dt}} \quad (3.13)$$

Si $A \leq 4$

$$PS = (1.1)P \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t \sqrt{A^2 + 1}} \right)} \right] \quad (3.14)$$

Si $A > 4$

$$PS = (1.1)P \left[1 - \frac{d}{t} \right] \quad (3.15)$$

Si $PS > P$

$$PS = P \quad (3.16)$$

Donde:

A : Coeficiente A [-]

D : Diámetro Exterior de la tubería [in]

t : Espesor Remanente [in]

d : Profundidad de corrosión [%]

L : Longitud de corrosión [in]

PS : Presión segura [kg/cm^2]

- f) Profundidad de corrosión. Este cálculo da una medida de la gravedad del deterioro de la tubería.

$$\text{Profundidad de corrosión} = \left(\frac{d}{t} \right) (100) \quad (3.17)$$

Donde:

d : Profundidad de la corrosión [in]

t : Espesor nominal del segmento de tubería [in]

- g) La delimitación de los tramos hidráulicos vulnerables (ZHV) se realizó calculando la diferencia de Presión Máxima de Operación y la Presión Segura para cada ZAC. Al resultado se le asignó una correspondencia la cual está descrita en la Tabla 3.13, la cual muestra tres intervalos y en esos intervalos se tienen las clasificaciones: 1) Atención inmediata (🔴), 2) Precaución (🟡), 3) Bajo riesgo (🟢).

3.3 ZAC para el caso de estudio

En las siguientes tablas (Tabla 3.1 a la Tabla 3.11) se recopila la información pertinente para identificar las ZAC. En los este párrafo se describen la forma en que se han agrupado los datos en las tablas. El encabezado de dichas tablas contiene lo siguiente

En la columna 1 se numeran las ZAC, esto con la finalidad de una rápida identificación, la numeración parte del 1 al 147 este último es el total de las ZAC identificadas en el sistema de transporte.

La columna 2 es la ubicación de cada una de las ZAC de acuerdo a su ubicación a lo largo del sistema de transporte esta numeración es a partir la estación de bombeo Nuevo Teapa, Veracruz y termina en la estación de recibo en Cadereyta, Nuevo León.

La columna 3 es el nombre designado para cada ZAC, esta es generalmente es de acuerdo al población, río o laguna cercanos al sistema de transporte.

La columna 4 es la altitud a la que se ubica la ZAC, estos datos están en función del relieve de la zona por los cuales atraviesa el sistema de transporte

La columna 5 es el número de viviendas aledañas a al sistema de transporte

La columna 6 es el número de habitantes en las viviendas aledañas al sistema de transporte.

La columna 7 Contiene los resultados del cálculo de la longitud de afectación máxima en la cual se localizan las viviendas a lo largo del ducto,

La columna 8 Es la distancia de afectación máxima a en el caso de cruce de río.

La columna 9 es la clase de localización que se le asigno cada ZAC de acuerdo al PAID. Esta clase de localización está en función de: 1) Zona poblada, 2) Cruce de río 3) Zona extremadamente sensible.

La columna 10 corresponde al cálculo del segmento afectado, cuyo cálculo esta descrito en la metodología.

Tabla 3.1 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 1.

Columna									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
1	3.7	ZAC Los García	21	5	18	170		1	770
2	5	ZAC Santa Helena	17.5	113	340	270		3	870
3	6.5	ZAC Coatzacoalcos	12.6	920	2915	823		4	1423
4	7	Río Coatzacoalcos	10.8				500	Cruce de río	1100
5	19.9	Río Calzadas	1				40	Cruce de río	640
6	24	ZAC Barrancas	7	784	2465	1589		3	2189
7	28	ZAC Los Cerritos	13	536	1670	1540		3	2140
8	30.8	ZAC Las Lomas Cerritos	16	96	309	230		3	830
9	32	ZAC Chapopote	18.2	142	480	160		3	760
10	36	ZAC Planta Química	23.5	2	4	311		1	911
11	38	ZAC Chacapala	26.1	780	2298	1400		3	2000
12	39	ZAC San Vicente	27	25	81	207		2	807
13	48	ZAC Santa Cecilia	39	5	27	103		1	703
14	54	ZAC San Andrés Chamilpa	46.9	154	651	280		3	880
15	108	ZAC El Popotal	117.4	251	881	953		3	1553
16	112	Río Tuxtla	122.6				52	Cruce de río	652
17	113.1	ZAC El Laurel	124.1	548	1470	292		3	892

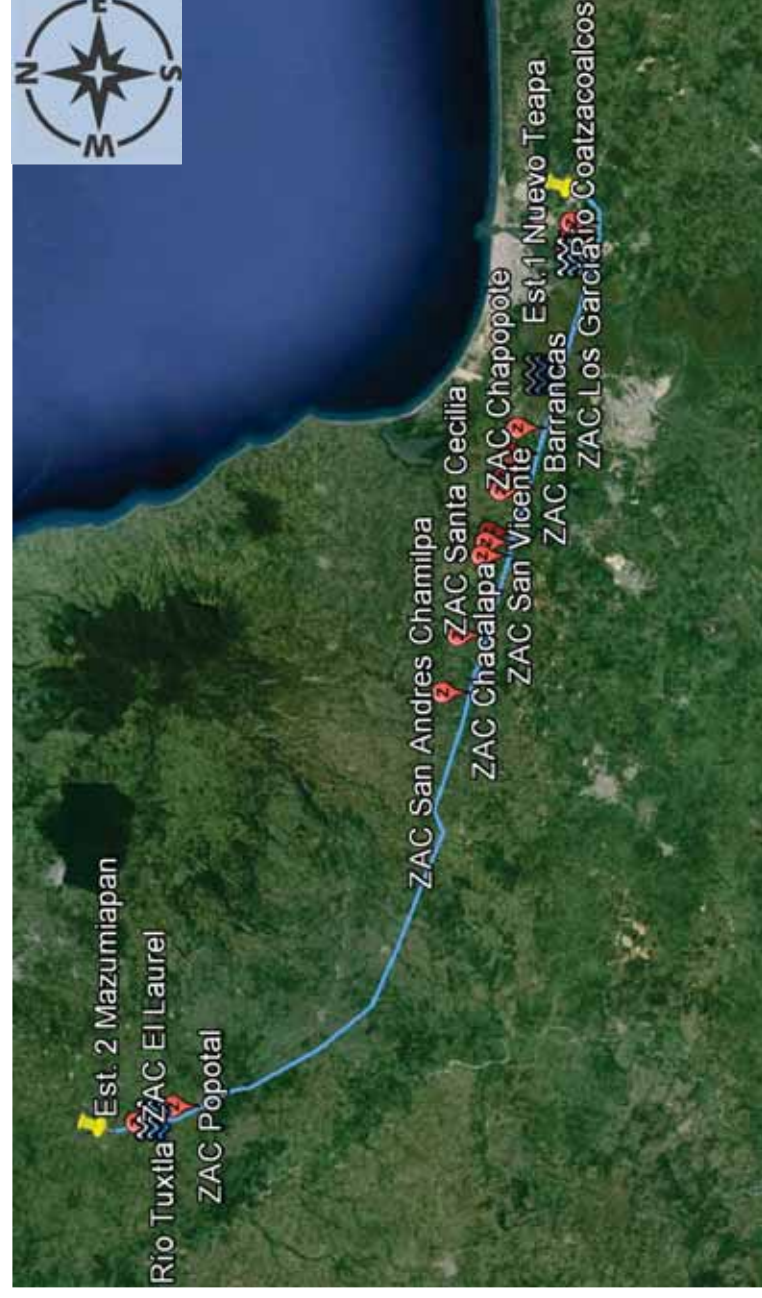


Figura 3.1 Segmento 1 Est. 1-Est. 2 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.2 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 2.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNIM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
18	118+500	ZAC Rincón de Zapatero	34.0	233	843	749		3	1349
19	119+000	ZAC Ojo de agua	35.0	163	537	183		3	783
20	120+900	ZAC Boca del Monte	46.0	167	519	574		3	1174
21	124+100	ZAC San Marcos	53.0	119	429	162		3	762
22	129+100	ZAC Tlapacoyan	63.0	315	1241	686		3	1286
23	149+100	ZAC Santa Teresa	17.0	221	626	392		3	992
24	151.1	ZAC Pocheta	14.2	86	250	88		2	688
25	182+000	ZAC Enramada de Bulmaro	35.0	208	670	168		3	768
26	1+300.1	Río Papaloapan	33.0				460.0	Cruce de río	1060
27	18+.001	ZAC Colonia vista hermosa	33.0	490	1425	105		3	705
28	185+000	ZAC Las Brisas	24.0	301	758	322		3	922
29	193+100	ZAC Arbolillo	8.0	392	1082	688		3	1288
30	195+000	ZAC Buen País	10.0	131	421	289		3	889
31	198+100	ZAC El Aguacate	12.0	78	212	158		3	758
32	217+000	ZAC La Piedra	10.0	210	503	573		3	1173
33	225+900	ZAC Laguna y Monte Castillo	13.6	726	1920	1117		3	1717
34	227+000	ZAC Báscula y La Unión	13.0	62	157	890		3	1490
35	233+900	ZAC Alvaradito	13.0	1183	3451	1336		3	1936
36	235+100	Río Cotaxtla	13.0				63	Cruce de río	663
37	235+500	ZAC Colonia Colosio	12.9	145	332	268		3	868
38	236+000	Río Jamapa	12.0				25	Cruce de río	625

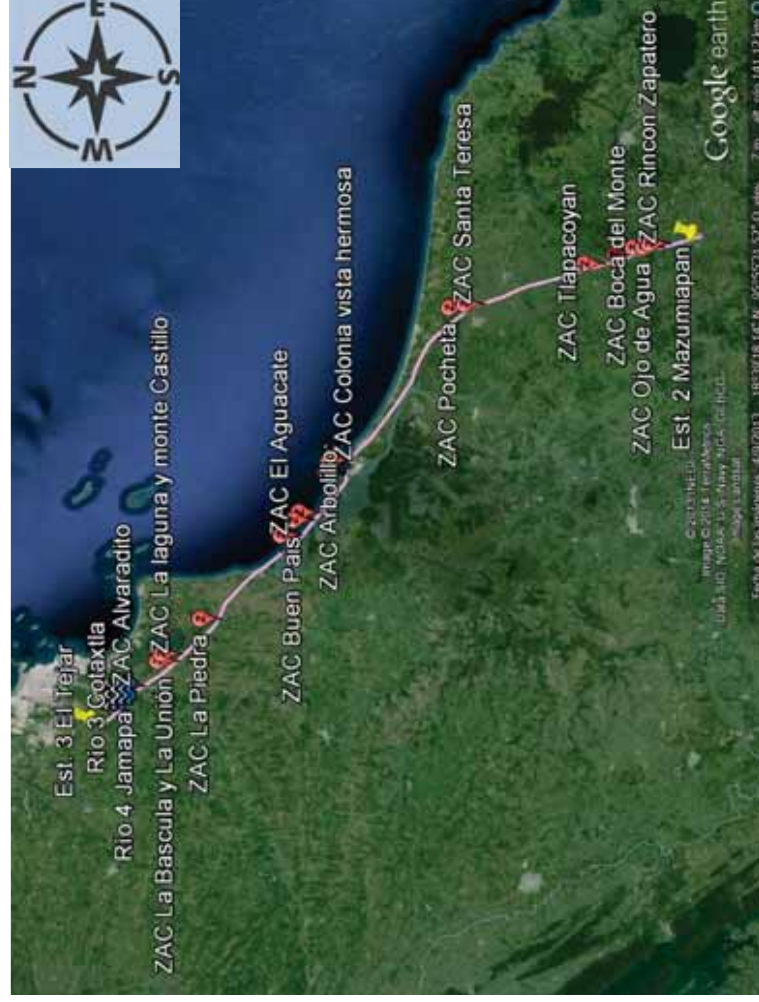


Figura 3.2 Segmento 2 Est.2-Est.3 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.3 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 3.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
39	240+200	ZAC El Aguacate	10.2	37	107	1300		2	1900
40	249+000	ZAC Santa Helena	8.0	36	99	304		2	904
41	260+000	ZAC Plan del manantial	73.0	293	917	225		3	825
42	261+000	ZAC Zapotito	75.0	55	156	318		3	918
43	263+000	ZAC El Coyuco	76.0	27	73	154		2	754
44	269+000	ZAC Loma Fina	85.0	149	435	85		3	685
45	271+000	Río Chico	74.0				45	Cruce de río	645
46	275+000	Río La Antigua	38.0				94	Cruce de río	694
47	287+000	Río Paso de la Milpa	5.0				38	Cruce de río	638
48	296+000	ZAC Gabriel Solís	8.0	25	75	306		2	906
49	327+000	Río Palma Sola	42.0				20	Cruce de río	620
50	328+000	ZAC Palma Sola	47.0	953	2907	1501		3	2101
51	330+000	Río Arroyo El Platanar	54.0				20	Cruce de río	620
52	343+000	ZAC La Defensa	19.0	104	242	422		3	1022
53	343+000	ZAC Santa Ana	18.0	369	894	438		3	1038
54	344+000	Río Santa Ana	18.0				40	Cruce de río	640
55	349+000	Laguna San Agustín	13.0				3500	Laguna	4100
56	352+100	Río La Florida	13.0				44	Cruce de río	644

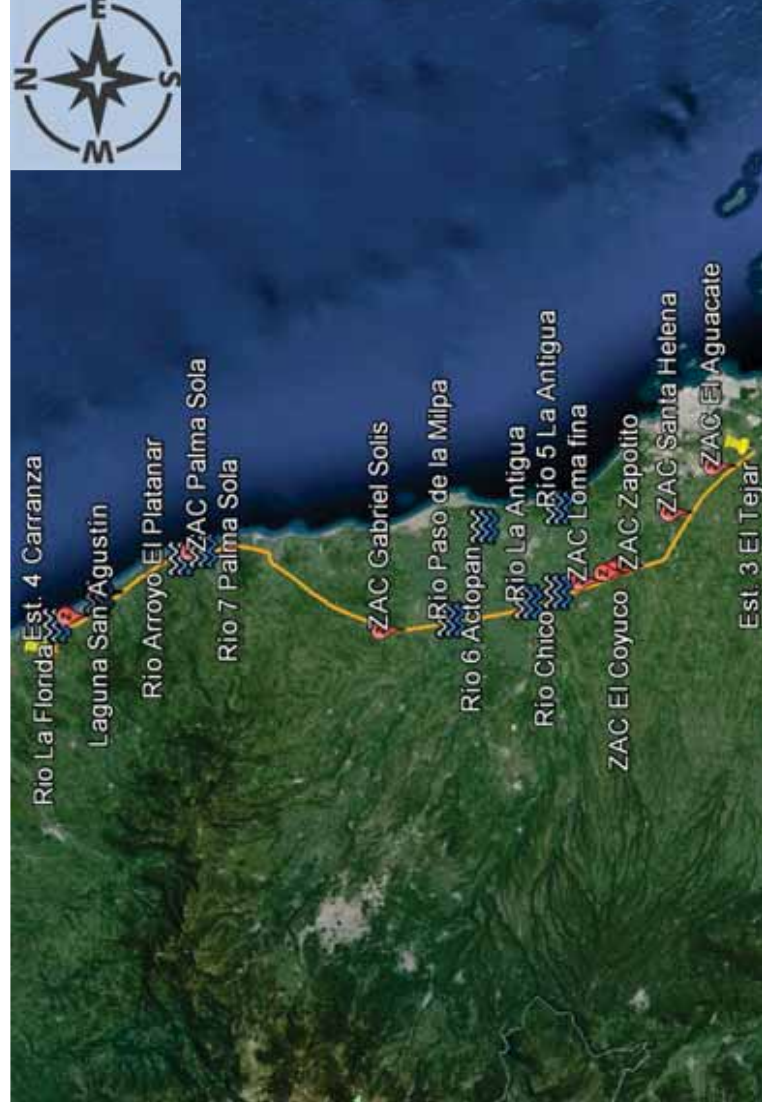


Figura 3.3 Segmento 3 Est.3-Est.4 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.4 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 4.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
57	353+000	Río Juchique	13.0				50	Cruce de río	650
58	353+000	ZAC Emilio Carranza	13.0	534	1182	1200		3	1800
59	360+000	Río Colipa	16.0				127	Cruce de río	727
60	361+000	ZAC Vega de Alatorre	23.0	267	563	488		3	1088
61	366+000	ZAC El Diamante	42.0	60	157	343		3	943
62	376+000	Río Coralillo	15.0				100	Cruce de río	700
63	379+000	ZAC Santa Catalina	14.0	32	72	861		2	1461
64	388+000	Río Nautla	37.0				93	Cruce de río	693
65	389+000	ZAC 13 de diciembre	40.0	64	174	863		3	1463
66	390+000	ZAC El Pireo	39.0	281	832	732		3	1332
67	417+000	ZAC EL Porvenir	84.0	44	147	215		2	815
68	421+000	ZAC 5 de Mayo	104.0	196	597	559		3	1159
69	423+000	Río Chichicatzapan	89.0				25	Cruce de río	625
70	427+000	ZAC Rafael Rosas	64.0	161	580	437		3	1037
71	434+800	Río Tecolutla	58.0				115	Cruce de río	715
72	455+700	Río El Pedregal	46.0				387	Cruce de río	987
73	457+700	ZAC Coatzintla	50.6	1674	5010	2958		3	3558
74	462+000	ZAC Poza Rica	74.0	1358	4539	1724		4	2324

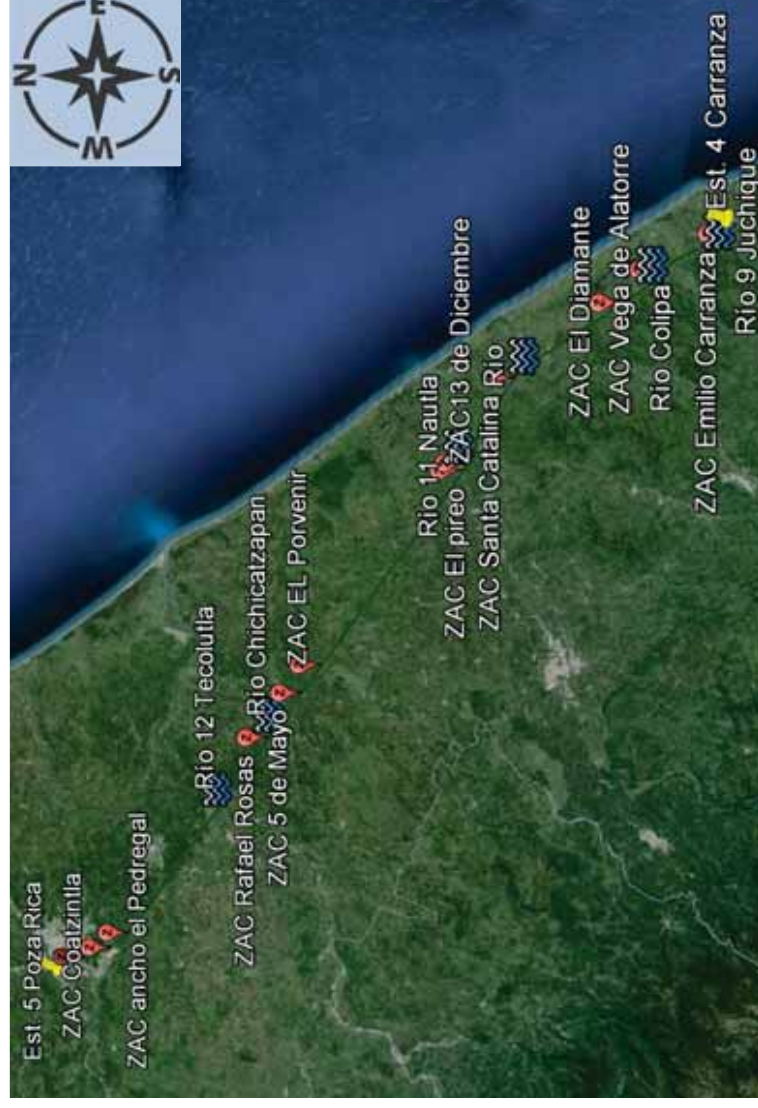


Figura 3.4 Segmento 4 Est. 4-Est.5 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.5 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 5.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
75	462+000	Río Cazones	73.4				195	Cruce de río	795
76	463+100	ZAC Plan de Ayala	83.3	544	1460	982		3	1581
77	467+000	ZAC Nabor Pérez	117.2	519	1691	454		3	1054
78	468+000	ZAC General Lázaro Cárdenas	126.0	257	1016	474		3	1074
79	475+000	ZAC Cerro Buenavista	108.2	76	312	453		3	1054
80	494+900	ZAC Palma Real	150.2	42	160	227		2	827
81	501+000	ZAC San Isidro	94.6	239	1042	1019		3	1619
82	504+000	ZAC Zanja del Bote	74.3	132	469	281		3	881
83	511+000	Río Pantepec	113.2				110	Cruce de río	710
84	515+500	ZAC Bienes Nacionales y Chapopote	206.3	822	2784	1025		3	1625
85	532+000	ZAC Potrero del Llano	72.1	441	1318	2003		3	2603
86	544+000	ZAC Cerro Azul	51.6	1009	3238	4947		3	5547
87	564+300	ZAC Naranjos	101.1	2848	8527	4678		4	5278

+

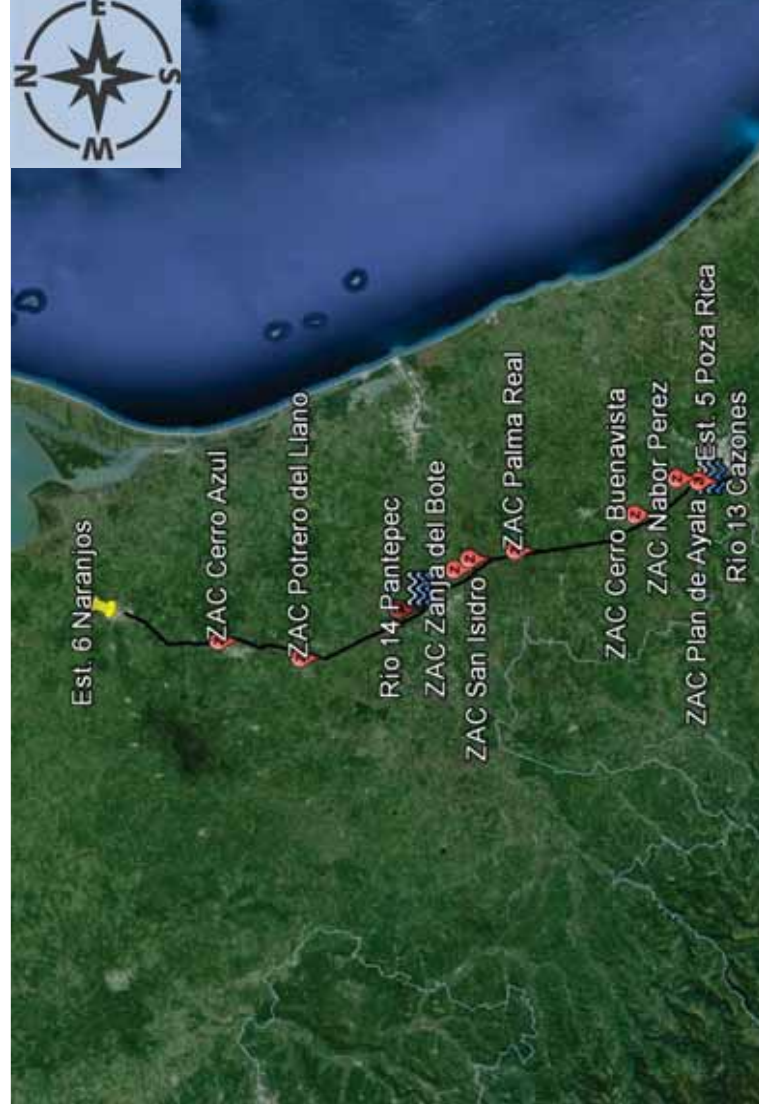


Figura 3.5 Segmento 5 Est.5-Est.6 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.6 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 6.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNIM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
88	565+000	Río Tancochin	115.4				85	Cruce de río	685
89	568+000	ZAC Ejido Empalizada	174.7	3	10	78		1	678
90	572+000	ZAC El Xúchitl Viejo	188.1	71	272	327		3	927
91	574+000	ZAC El Puente	180.8	91	366	362		3	962
92	585+000	ZAC El Anono Cucharas	180.0	92	335	243		3	843
93	587+000	Río Cucharas	130.9				130	Cruce de río	730
94	611+900	ZAC Potrerillos	52.3	140	476	1251		3	1851
95	626+600	ZAC Horconcos	24.0	101	260	422		3	1022
96	627+300	ZAC El Porvenir	24.4	41	120	252		3	852
97	655+000	ZAC Tampico Alto	55.4	346	924	1354		3	1954
98	672+000	Río Panuco	40.1				420	Cruce de río	1020
99	672+000	ZAC Tampico	40.1	3134	9562	7812		4	8412



Figura 3.6 Segmento 6 Est. 6-Est. 7 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.7 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 7.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
100	673+000	ZAC Cd Madero	46.5	4183	10536	2343		4	2945
101	680+000	ZAC Miramar	48.4	1906	5997	1036		4	1636
102	685+000	ZAC Miramar 2	32.1	19191	38173	3007		4	3607
103	688+000	ZAC Altamira	22.2	8401	14341	5344		4	5944
104	711+000	ZAC Buenos Aires	10.1	1	10	551		1	1151
105	722+000	ZAC La Redención	10.1	432	1528	606		3	1206
106	761+000	Río arroyo El Cojo	19.7				22	Cruce de río	622

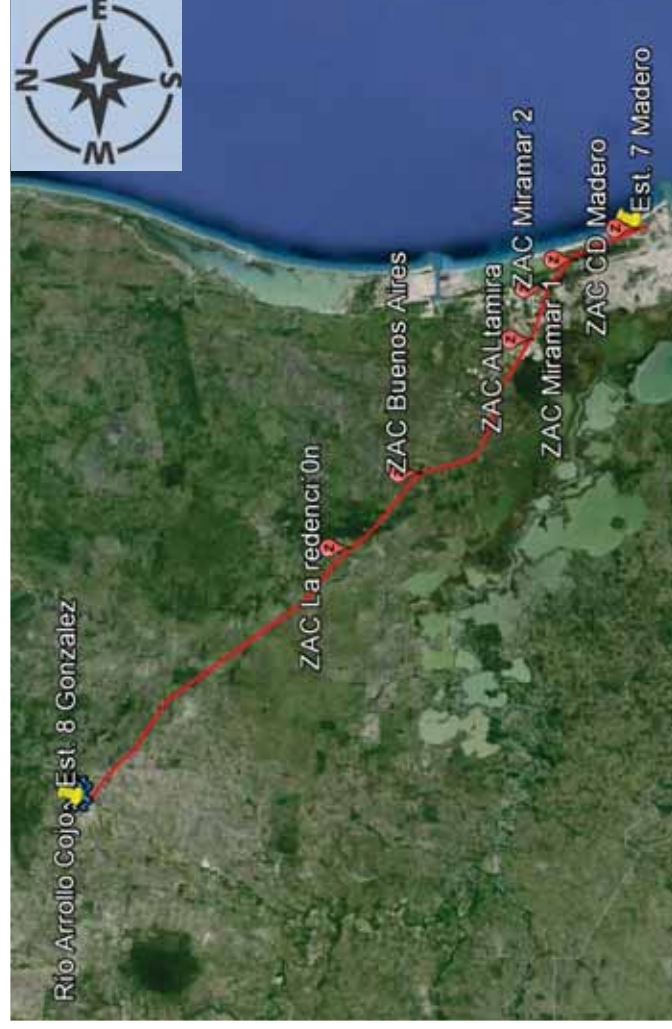


Figura 3.7 Segmento 7 Est.7-Est.8 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.8 Resultados de análisis correspondiente al Segmento 8.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
107	761+000	ZAC González	19.7	1905	5911	1449		3	2049
108	770+000	ZAC Gallinas	54.0	1	1	53		1	653
109	790+000	ZAC El Ciprés	88.6	4	7	50		1	650
110	804+000	ZAC El Ciprés 2	94.7	23	66	220		2	820
111	813+000	Río Guayalejo	102.5				55	Cruce de río	600

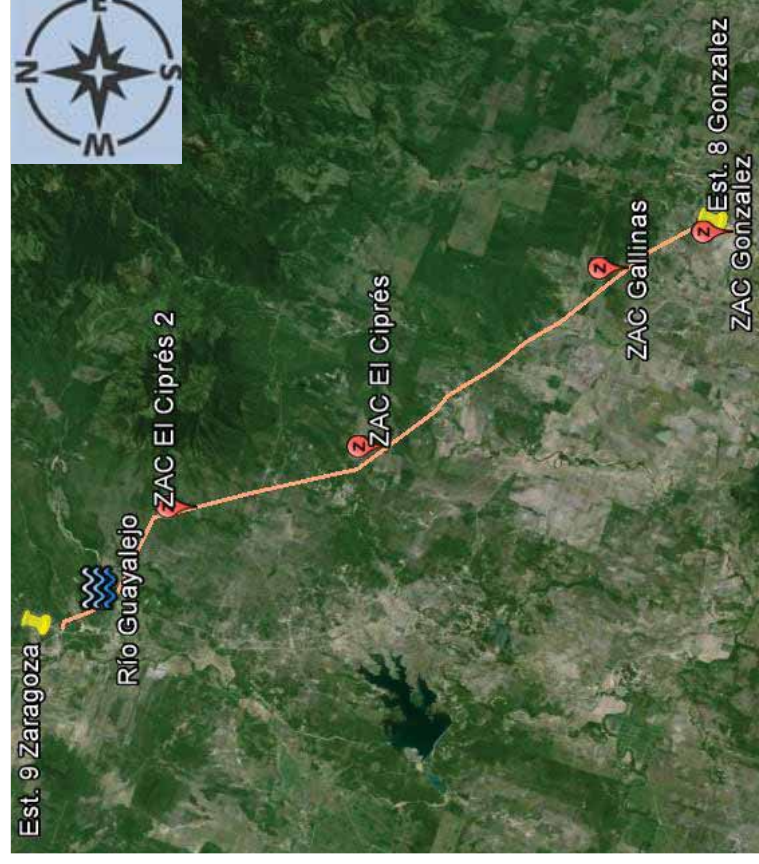


Figura 3.8 Segmento 8 Est. 8-Est. 9 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.9. Resultados de análisis correspondiente al Segmento 9.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNIM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
112	813+000	ZAC entrada a Zaragoza (las Palmas)	102.5	4	8	149		1	749
113	819+000	ZAC Capitán Emilio Carranza	80.0	81	278	412		3	1012
114	841+000	ZAC Estación San Francisco	146.2	37	116	1301		2	1901
115	849+000	ZAC Las Tortugas	211.1	69	222	500		3	1100
116	876+000	Río Arroyo Juan Capitán	215.3				25	Cruce de río	625
117	891+000	ZAC Cd. Victoria	197.5	125	370	1475		3	2075
118	894+000	ZAC Cd. Victoria 2	198.4	131	380	801		3	1401

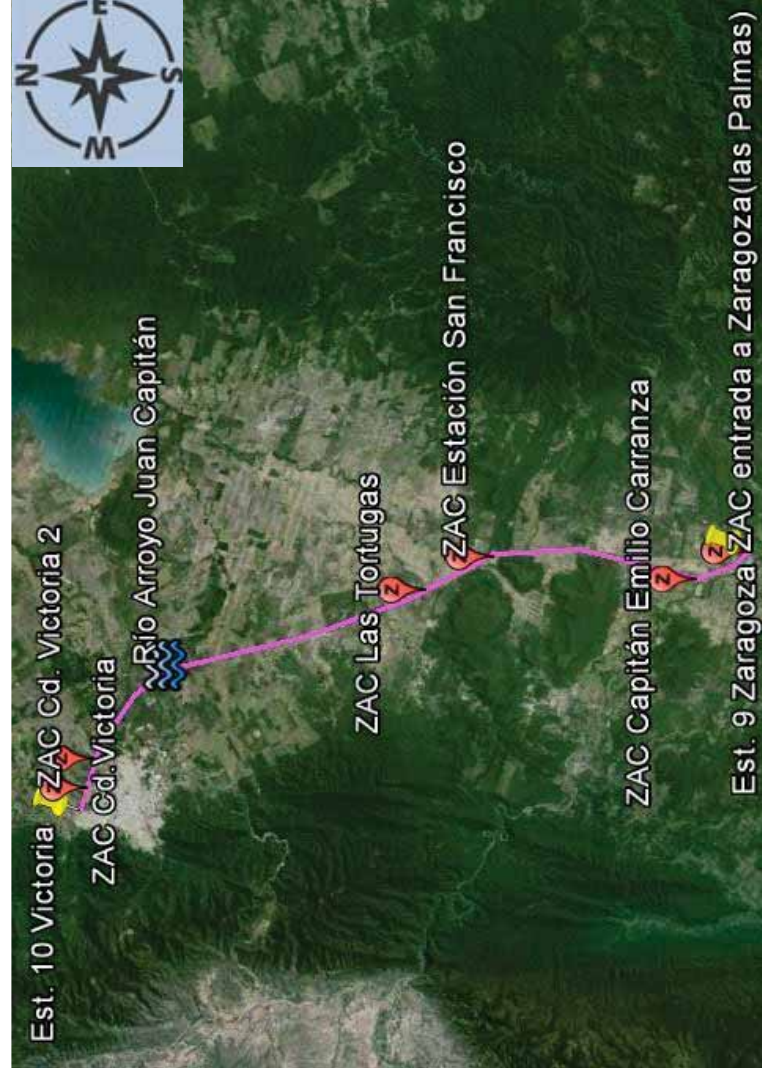


Figura 3.9 Segmento 11 Est.10-Est.11 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.10. Resultados de análisis correspondiente al Segmento 10.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNMM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
119	896+000	ZAC La Misión	211.4	230	549	1875		3	2475
120	901+000	ZAC Alianza de Caballeros	210.6	223	577	160		3	760
121	902+000	ZAC Congregación caballeros	207.8	244	836	835		3	1435
122	903+000	Río Santa Ana	203.6				40	Cruce de río	640
123	908+000	ZAC Estación Carbonero	220.2	85	187	537		3	1137
124	916+000	Río San Pedro	246.9				83	Cruce de río	683
125	919+000	ZAC Guillermo Zúñiga 1	262.6	41	170	505		2	1105
126	920+000	Río Santa Engracia	266.4				52	Cruce de río	652
127	920+000	ZAC Guillermo Zúñiga 2	266.4	439	1608	256		3	856
128	930+000	Río Purificación	316.4				100	Cruce de río	700
129	931+000	ZAC Estación la Cruz	321.2	147	284	460		3	1060
130	936+000	ZAC Oyama	351.2	317	883	930		3	1530
131	948+000	ZAC San Francisco	276.8	304	778	1730		3	2330
132	962+000	ZAC Narciso Mendoza	232.2	76	242	570		3	1170
133	976+000	ZAC Mariano Escobedo	223.3	44	72	348		2	948
134	980+000	ZAC Miguel Hidalgo	222.7	71	192	477		3	1077
135	998+000	ZAC Magueyes	228.2	200	478	900		3	1500
136	1011+000	ZAC El Guajolote	254.4	70	170	537		3	1137
137	1029+000	ZAC San José	319.4	6	20	613		1	1213
138	1031+000	ZAC Pabillos	318.4	21	67	166		2	766
139	1031+000	Río Pabillos	318.4				141	Cruce de río	741
140	1032+000	ZAC Las Alamedas	320.6	647	2069	995		3	1595



Figura 3.10 Segmento 10 Est.10-Est.11 con Zonas de Alta Consecuencia.

Tabla 3.11. Resultados de análisis correspondiente al Segmento 11.

# ZAC	Longitud [km]	ZAC	ASNIM [m]	Núm. Viviendas	Núm. Hab.	Long. Viviendas [m]	Ancho río [m]	Clase de localización PAID	Segmento afectado ZAC [m]
141	1049+000	ZAC Parientes (la cruz de abajo)	350.8	33	114	275		2	875
142	1052+000	Río Potosí	322.1				130	Cruce de río	730
143	1066+900	ZAC El Gavilán	375.3	35	110	390		2	990
144	1074+000	Río Pilón	350.7				215	Cruce de río	815
145	1075+000	ZAC Montemorelos	375.3	2788	8001	2005		4	2605
146	1099+000	ZAC Estación Vaqueros	350.7	55	160	877		3	1477
147	1117+200	Río San Juan	464.4				105	Cruce de río	705

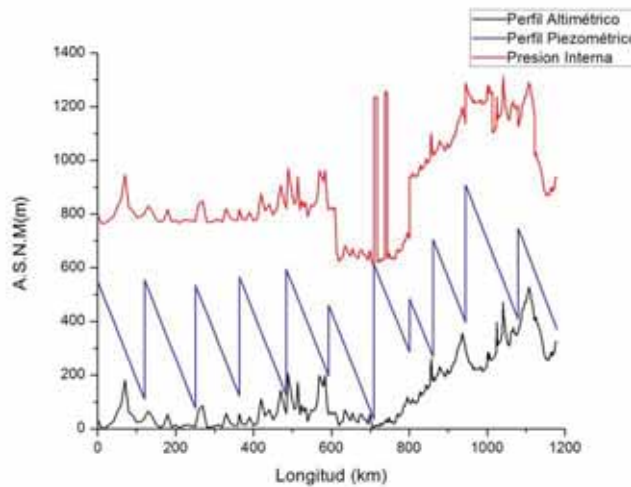


Figura 3.11 Segmento 11 Est. 11-Est. 12 con Zonas de Alta Consecuencia.

3.4 ZHV para el caso de estudio

En congruencia con la metodología descrita en la sección 3.2, la determinación de las ZHV implica la comparación de los niveles de presión segura respecto de la MAOP (estado permanente) y evolvente máxima de sobrepresión por transitorio hidráulico (estado no permanente).

La simulación del estado permanente implica el trazo de los niveles piezométricos basados en las condiciones operativas (Tabla 2.2) y una primera aproximación al nivel de presiones seguras a partir de la presión interna de diseño (tubo nuevo, Gráfica 3.1).



Gráfica 3.1 Diagrama de energía. Condición de estado permanente y tubo nuevo

La tabla siguiente (Tabla 3.11) resume las condiciones de integridad mecánica relacionadas con corrosión galvánica (longitud y profundidad de corrosión [%]) los cuales permitieron simular los niveles de presión segura (Figura 3.11).

Tabla 3.12 Puntos con corrosión galvánica en el sistema de transporte.

# ZAC	Profundidad de corrosión [%]	L _{corrosión} [in]	P _{segura} [kg/cm ²]
1	33.6	0.8	68.4
2	27.6	1.0	68.4
3	20.8	1.2	68.4
6	9.2	3.5	68.4
7	18.4	3.8	68.4
8	27.0	3.8	68.3
9	33.4	3.5	68.2
10	54.0	2.6	67.6

# ZAC	Profundidad de corrosión [%]	L _{corrosión} [in]	P _{segura} [kg/cm ²]
11	64.4	2.1	67.4
12	69.5	1.9	67.2
13	23.2	2.0	68.2
14	29.9	3.5	63.6
15	7.2	7.3	68.0
17	11.9	7.5	66.8
18	29.8	7.4	63.9
19	31.5	7.4	63.6

# ZAC	Profundidad de corrosión [%]	L _{corrosión} [in]	P _{segura} [kg/cm ²]
20	70.7	4.1	55.7
21	63.8	4.9	56.5
22	53.2	6.3	57.7
23	27.0	4.9	67.5
24	20.1	4.5	68.4
25	59.2	3.2	61.6
27	55.2	3.1	62.5
28	48.4	2.9	64.2

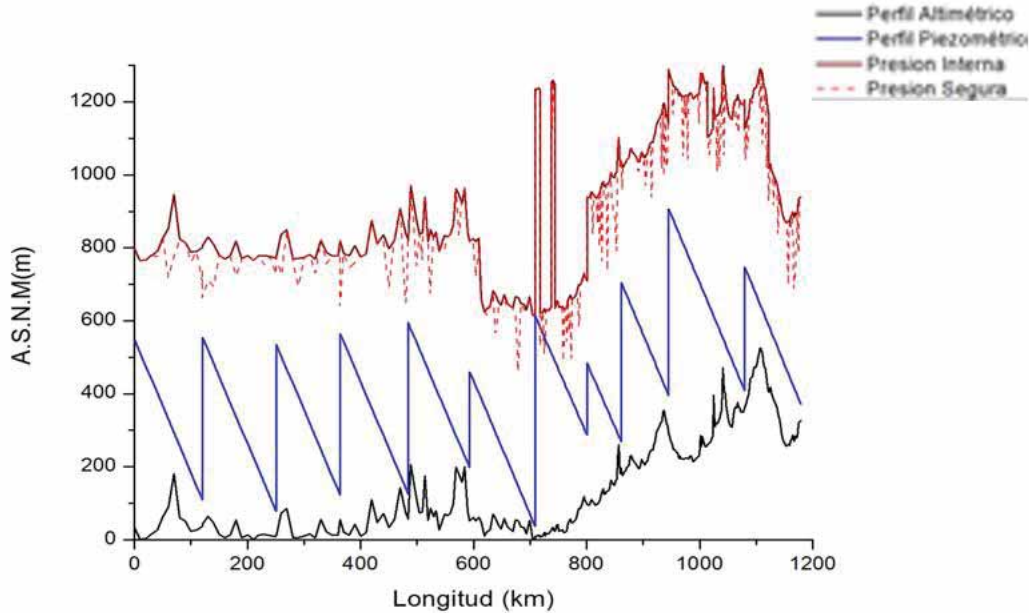
# ZAC	Profundidad de corrosión [%]	L _{corrosión} [in]	P _{segura} * [kg/cm ²]
29	27.3	4.1	68.4
30	25.3	5.1	68.4
31	22.0	6.7	68.4
32	23.3	5.1	68.4
33	29.4	5.1	67.1
34	31.7	4.9	66.8
35	22.9	5.1	67.0
37	16.8	5.5	67.4
39	0.5	6.5	68.4
40	29.7	7.0	64.8
41	57.8	4.8	58.5
42	52.0	5.0	59.5
43	40.5	5.4	61.5
44	5.8	6.7	67.4
48	43.1	4.3	65.6
50	12.7	4.0	67.7
52	45.7	2.4	66.5
53	45.7	2.4	66.5
58	12.1	2.6	68.4
60	33.4	3.2	68.4
61	46.2	6.6	57.6
63	36.8	4.2	65.9
65	35.0	6.3	64.4
66	34.5	6.5	64.2
67	0.0	6.3	68.4
68	1.8	6.5	68.4
70	12.4	6.8	68.4
73	18.0	1.7	66.3

# ZAC	Profundidad de corrosión [%]	L _{corrosión} [in]	P _{segura} * [kg/cm ²]
74	6.8	0.6	68.4
76	5.9	0.7	68.4
77	2.6	1.3	68.4
78	1.7	1.4	68.4
79	35.2	3.7	60.0
80	42.3	2.9	62.3
81	72.0	2.6	61.5
82	67.3	1.5	68.0
84	30.2	1.5	68.4
85	57.4	0.9	68.4
86	0.0	7.3	68.4
87	0.1	2.3	68.4
89	3.9	3.5	68.4
90	35.5	4.2	62.9
91	56.9	4.5	59.0
92	35.2	2.1	68.4
94	30.3	1.1	58.6
95	32.3	4.0	53.9
96	34.2	3.2	54.2
97	9.1	4.2	54.6
99	39.4	3.5	52.4
102	57.1	1.9	54.6
104	6.4	3.1	109.2
107	6.2	1.0	53.6
108	48.6	5.3	47.9
109	0.1	5.8	54.8
110	1.9	4.5	75.5
112	0.0	5.4	75.5

# ZAC	Profundidad de corrosión [%]	L _{corrosión} [in]	P _{segura} * [kg/cm ²]
113	64.5	3.7	68.2
114	44.8	1.4	75.5
115	44.5	7.3	66.2
117	32.5	4.9	73.2
118	20.3	3.3	74.0
119	0.0	3.1	75.5
120	45.3	3.2	73.4
121	26.3	4.0	74.1
123	31.7	0.9	75.5
125	22.2	3.6	75.5
127	14.8	2.7	75.5
129	3.8	6.4	75.5
130	40.1	4.7	68.2
131	12.6	4.7	89.1
132	9.0	5.4	89.0
133	28.2	4.7	85.7
134	56.7	4.9	79.7
135	16.8	6.8	86.0
136	8.6	4.1	89.1
137	17.1	6.0	75.5
138	56.9	5.6	63.1
140	49.7	0.0	66.7
141	46.5	2.8	74.4
143	50.8	4.0	70.2
145	39.7	1.3	75.5
146	0.0	1.6	68.4
147	6.1	3.0	68.4

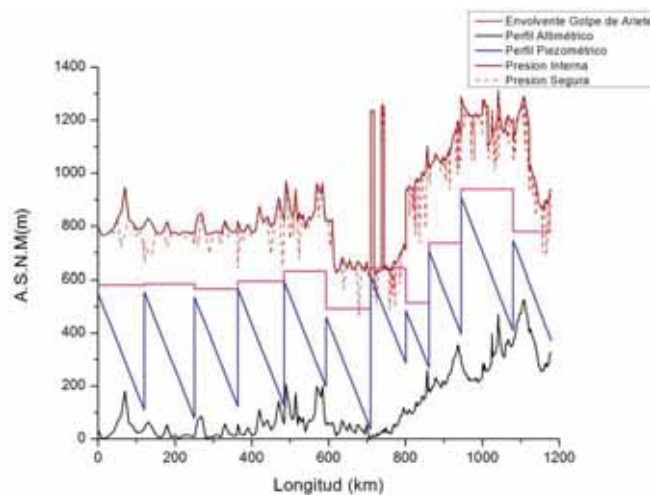
*P_{segura} Presión segura.

Debe advertirse que estos datos de corrosión no concuerdan con la condición actual de la tubería y tienen como propósito ejemplificar exclusivamente la metodología desarrollada en esta tesis. La metodología para realizar los datos se puede consultar en la tesis de García- (García Lugo, 2012).



Gráfica 3.2 Diagrama de energía. Condición de estado permanente con envolvente de presiones seguras.




Por otra parte se consideró como escenario de estado no permanente, la generación de golpe de ariete por la súbita salida de operación de las estaciones de rebombeo con eficiencia de relevo del 80%. Por supuesto que este escenario no es el único posible, pero es adecuado para ejemplificar la metodología. La Figura 3.13 muestra las envolventes máximas de sobrepresión por golpe de ariete calculadas bajo la metodología de la sección 3.2.



Gráfica 3.3 Diagrama de energía. Condición de estado no permanente con envolvente de sobrepresión de golpe de ariete.

Usando las distancias relativas entre los niveles de sobrepresión por golpe de ariete y los correspondientes a la presión segura es posible identificar las ZHV y ponderar su nivel de riesgo aceptando que mientras menor es la distancia entre ellas, mayor es el riesgo. Para calificar el nivel de cercanía, para este trabajo de tesis se establecieron tres criterios de ponderación denominados: Atención Inmediata, Precaución y Bajo Riesgo (Tabla 3.13).






Tabla 3.13 Criterios de clasificación de ZHV.

$P_{\text{Segura}}^* - P_{\text{máx}}^*$	Criterio de atención hidráulico	Columna1
Menor a 1 [kg/cm ²]		Atención inmediata
De 1 a 2 [kg/cm ²]		Precaución
Mayor a 2 [kg/cm ²]		Bajo riesgo

* P_{Segura} Presión Segura $P_{\text{máx}}$ Presión Máxima

La tabla siguiente (Tabla 3.14) resume la aplicación de estos criterios al sistema de conducción e identifica las ZHV.

Tabla 3.14 Zonas Hidráulicamente Vulnerables.

Tramo		Criterio de atención hidráulico
Del km	Al km	
680+000	2315+700	
761+000	1383+000	
673+000	3617+800	
688+000	6632+100	
722+000	1928+300	

Capítulo 4


4. Correspondencia entre ZAC y ZHV

La importancia de la Tabla 4.1 en la que se delimitan las ZHV es que en combinación con la clasificación de las ZAC, pueden identificarse correspondencias entre ellas que se traducen o se interpretan como una potenciación del riesgo inherente. Por correspondencia entre ZAC y ZHV debe entenderse la posibilidad de que una ZAC se encuentre inscrita o no a una ZHV y en su caso del nivel de atención con el cual se ha catalogado.

4.1 Correspondencia de ZAC y ZHV para pérdida de espesor >50%.

Observe por ejemplo que si se analizan en el sistema de conducción los puntos o regiones que tienen pérdidas de espesor mayores al 50%, se descubrirá que hay una ZAC ubicada en dicha ZHV que merecerán especial atención (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Correspondencia de ZAC y ZHV para pérdida de espesor >50%.

# ZAC	Seg	Longitud [km]	ZAC	Clase de localización PAID	Profundidad de corrosión [%]	Criterio de atención hidráulico
101	7	680+000	ZAC Miramar	4	72.4	







Atención inmediata

4.2 Correspondencia de ZAC con pérdida de espesor >50%. y ZHV en atención inmediata y precaución.

Es interesante observar que bajo la metodología planteada en este trabajo no es determinante una variable como la pérdida de espesor para alertarnos sobre la posibilidad de falla justo en una ZAC. La Tabla 4.2 resume la correspondencia de ZAC con ZHV para pérdidas de espesor menores al 50%.

Tabla 4.2 Correspondencia de ZAC y ZHV para pérdida de espesor <50%.

# ZAC	Seg	Longitud [km]	ZAC	Clase de localización PAID	Profundidad de corrosión [%]	Criterio de atención hidráulico
100	7	673+000	ZAC Cd Madero	4	48.0	
106	7	761+000	Río arroyo El Cojo	Cruce de río	6.2	
105	7	722+000	ZAC La Redención	3	38.8	
103	7	688+000	ZAC Altamira	4	35.9	



Atención inmediata















Precaución

4.3 Correspondencia de ZAC con pérdida de espesor <50%. y con bajo riesgo de ZHV.

Puede ocurrir también que las ZAC se encuentren en ZHV con altos niveles de pérdida de espesor pero con bajas posibilidades de falla (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Correspondencia de ZAC para pérdida de espesor >50% y baja posibilidad de falla.

# ZAC	Seg	Longitud [km]	ZAC	Clase de localización PAID	Profundidad de corrosión [%]	$P_{Segura} - P_{Máx}$	Criterio de atención hidráulico
143	11	106+900	ZAC El Gavilán	2	50.8	35.8	
91	6	574+000	ZAC El Puente	3	56.9	31.2	
134	10	980+000	ZAC Miguel Hidalgo	3	56.7	18.7	
85	5	532+000	ZAC Potrero del Llano	3	57.4	18.5	
82	5	504+000	ZAC Zanja del Bote	3	67.3	18.3	
10	1	36+000	ZAC Planta Química	1	54.0	17.8	
11	1	38+000	ZAC Chacapala	3	64.4	17.7	
12	1	39+000	ZAC San Vicente	2	69.5	17.7	
42	3	261+000	ZAC Zapotito	3	52.0	15.5	
41	3	260+000	ZAC Plan del manantial	3	57.8	14.3	
81	5	501+000	ZAC San Isidro	3	72.0	13.6	
27	2	183+100	ZAC Colonia vista hermosa	3	55.2	13.1	
113	9	819+000	ZAC Capitán Emilio Carranza	3	64.5	12.4	
25	2	182+000	ZAC Enramada de Bulmaro	3	59.2	12.4	

# ZAC	Seg	Longitud [km]	ZAC	Clase de localización PAID	Profundidad de corrosión [%]	$P_{\text{Segura}} - P_{\text{Máx}}$	Criterio de atención hidráulico
22	2	129+100	ZAC Tlapacoyan	3	53.2	11.0	👍
138	10	1031+000	ZAC Pablillos	2	56.9	10.3	👍
21	2	124+100	ZAC San Marcos	3	63.8	8.9	👍
20	2	120+900	ZAC Boca del Monte	3	70.7	7.4	👍
102	7	685+000	ZAC Miramar 2	4	57.1	2.8	👍

👍 Bajo riesgo

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

Como se presentó en el Capítulo 1 existen normas, la API 1160-2001 y la NOM-027-SESH-2010, las cuales regulan la seguridad en la operación de los sistemas de transporte por ductos. De la norma mexicana se deriva el Plan de Administración de Integridad en Ductos (PAID), en el cual se describe la metodología con la cual se interpreta dicha norma. El análisis de seguridad requiere la identificación de Zonas de Alta Consecuencia (ZAC) sobre las cuales se evalúa la posibilidad de falla del sistema así como se cuantifican las consecuencias de un incidente. Los detalles de la metodología de clasificación de las ZAC fue descrita en esta tesis en el Capítulo 1 (ver Tabla 1.1 clasificaciones ZAC).

Actualmente, las evaluaciones de integridad sólo se basan en la clasificación de ZAC las cuales son descritas en el PAID y a las condiciones mecánicas del ducto. Estas evaluaciones no toman en cuenta las variables hidráulicas, omitiendo un importante factor de riesgo en la evaluación integral de sistemas de conducción.

Los sistemas de conducción de hidrocarburos presentan una alta probabilidad de fenómenos transitorios y debido a ellos se generan las sobrepresiones, por lo cual la metodología desarrollada en el presente documento se debe tomar en cuenta para incluirse como carácter obligatorio. Es importante tratar la cuestión hidráulica de la misma manera en la que actualmente se detallan los aspectos mecánicos como los es la corrosión.

La presente tesis demuestra mediante el análisis de un caso de estudio (Capítulo 2) como incorporar las variables hidráulicas en el PAID. El resultado es una metodología extrapolable a otros sistemas de conducción.

En el caso de estudio analizado se inició identificando las ZAC, para después clasificarlas de acuerdo al PAID (Capítulo 3). Después se procedió a adicionar el análisis hidráulico al caso de estudio para incorporar escenarios de riesgo.

Para evaluar la hipótesis, en esta tesis se definieron para el análisis hidráulico 3 niveles de riesgo clasificados como: "atención inmediata", "precaución" y "bajo riesgo". Estos niveles permiten definir las Zonas Hidráulicamente Vulnerables (ZHV). Por su parte, el análisis de integridad basa su clasificación de riesgo en función del porcentaje de corrosión. A lo largo del Capítulo 4 se buscó asociar la relación entre los criterios hidráulicos y de integridad afín de sub-clasificar las ZAC y encontrar criterios que permitan priorizar la atención.

La Tabla 4.1 muestra la correspondencia más obvia entre ZAC que contienen tramos con altos niveles de corrosión ($> 50\%$) con respecto a ZHV que requieren atención inmediata. En este caso la contribución de la identificación de las ZHV permite priorizar la atención de dichos tramos en función de la posibilidad de ocurrencia de un escenario de riesgo. En este caso, el no haber realizado el análisis hidráulico no sería tan grave como en los casos siguientes.

La Tabla 4.2 lista ZAC en la que se incluyen tramos con corrosiones $< 50\%$ y que según la interpretación actual del PAID no requeriría atención urgente. La visión cambia radicalmente cuando se contrasta estas zonas con las ZHV. El resultado demuestra que la interpretación del PAID está incompleta al no evaluar el riesgo hidráulico. Esta omisión puede ser muy grave como se muestra en la Tabla 4.2 y valida la hipótesis planteada para este proyecto.

Por su parte en la Tabla 4.3 se listan las ZAC con porcentajes de corrosión mayores a 50 y que coinciden con ZHV catalogadas como de bajo riesgo. Aún en este caso el análisis hidráulico es útil pues a partir de él se puede priorizar la atención. Esto se realiza de acuerdo a su diferencia de $P_{Máx}$ y P_{Segura} , proponiendo atender primeramente las ZAC con porcentajes de corrosión mayores a 50% y las que poseen la diferencia de presiones más pequeña para el escenario operativo de riesgo más grande.

En resumen en esta tesis se propone priorizar la atención de las ZAC del sistema de conducción de la manera siguiente.

1. La ZAC que tienen porcentajes de corrosión $> 50\%$ y presentan riesgo de vulnerabilidad hidráulica. Atendiendo primeramente los porcentajes de corrosión mayores y que a su vez presenten un riesgo hidráulico de atención inmediata.
2. Las ZAC que presentan porcentajes de corrosión > 50 y presentan riesgo de vulnerabilidad hidráulica. Atendiendo primeramente los porcentajes de corrosión mayores y que a su vez presentan un riesgo hidráulico en precaución.
3. Las ZAC que arrojan un riesgo de vulnerabilidad hidráulica en atención inmediata y porcentaje de corrosión $< 50\%$.
4. Las ZAC que tienen un riesgo de vulnerabilidad hidráulica en precaución y porcentajes de corrosión $< 50\%$.
5. Las ZAC que tienen porcentajes de corrosión $> 50\%$ y bajo riesgo de vulnerabilidad hidráulica. Proponiendo atender primeramente las ZAC que tiene la diferencia de $P_{Máx}$ y P_{Segura} más pequeña.

Referencias

- API. (2001). *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. U.S.A.
- ASME B31.8s. (2006). *Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids*. New York.
- Bentley. (2013). *Bentley | 2D & 3D Engineering Design CAD Software Solutions*. Recuperado el 20 de Marzo de 2013, de <http://www.bentley.com/es-MX/Products/Structural+Analysis+and+Design/>
- Engineers, T. A. (1991). *ASME B31G, Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines*. New York: ASME.
- García Lugo, F. (2012). *Metodología para determinar la presión de rehabilitación en líneas de transporte de hidrocarburos líquidos*.
- Guaycochea, D., & Soto, G. (2008). *Dimensionamiento de válvulas de alivio*. México, D.F.: UAM-A, Informe técnico de distribución restringida.
- IMP. (2013). *Instituto Mexicano del Petroleo*. (IMP) Recuperado el 03 de Octubre de 2013, de IMP: <http://www.imp.mx/petroleo/?imp=tipos>
- INEGI, I. N. (2014). *INEGI*. Recuperado el 2014, de <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *INEGI*. Recuperado el Febrero de 2014, de <http://www.inegi.org.mx/>
- J. Phillip Ellenberger, P. (2005). *Piping Systems & Pipeline ASME B31 CODE SIMPLIFIED*. United States of America: McGRAW-HILL.
- Mexicanos, P. (2012). *Informe de Avance del Programa para Incrementar la Eficiencia Operativa en Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios al Tercer Trimestre de 2012*. México.
- Nieto Garza, M. (2008). *Foro de Debate sobre la Reforma Energética del Senado de la Republica*. Mexico D.F.
- PAID. (2010). *Plan maestro*. PEMEX Plan Maestro. Secretaría de Energía, Gobierno Federal.
- Parfomak, P. W. (2013). *Keeping America's Pipelines Safe and Secure: Key Issues for Congress*. Congressional Research Service.
- Petróleos Mexicanos. (12 de Noviembre de 2003). (Petróleos Mexicanos) Recuperado el 09 de Junio de 2013
- Petróleos Mexicanos. (2011). Obtenido de Informes Pemex: <http://www.pemex.com/informes/responsabilidad_social/operaciones/desarrollo.html>
- Petroleos Mexicanos. (2011). *Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos. Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos(NRF-030-PEMEX-2009)*. México, D.F.
- Petróleos Mexicanos. (2011). *Informe de Responsabilidad Social*. Mexico D.F.: PEMEX.
- Petróleos Mexicanos. (2012). *Proyectos de Inversión en PEMEX Refinación*.
- Petroleos Mexicanos. (2013). Obtenido de <http://www.pemex.com/informes/responsabilidad_social/operaciones/desarrollo.html>

- Petróleos Mexicanos. (2013). *tercer informe trimestral 2012 Artículo 71 (párrafo primero) Ley de Petróleos Mexicanos*. México.
- Secretaría de Energía. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-027-SESH-2010 Norma Oficial Mexicana NOM-027-SESH-2010*,. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Energía. (Enero de 2013). (Gobierno Federal) Recuperado el 06 de Marzo de 2013, de Sistema de Información Energética: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>
- Shashi, M. (2004). *Liquid Pipeline Hydraulics*. NEW YORK • BASEL: MARCEL DEKKER, INC.
- Soto, G., & Guaycochea, D. (2007). *Cálculo de presiones seguras de operación en oleoductos y poliductos*. México, D.F.: UAM-A, Informe técnico de circulación restringida.

Anexo 1

Plan Maestro PAID

Sección 7. Acciones Preventivas, Correctivas y de Mitigación

7.1 Objetivo

El proceso de valoración y corrección / reparación tiene (3) objetivos principales.

- El descubrimiento de una indicación – Es el descubrimiento en un segmento de ducto, de una indicación que presente una amenaza importante a su integridad.
- La priorización de la corrección-reparación de tales condiciones en un programa
- La ejecución de las reparaciones con base en el programa priorizado.

Este proceso le proporcionará a PEMEX una lista priorizada de excavaciones para reparación de cada segmento con base en lo crítico de las condiciones encontradas (defectos identificados) durante la evaluación de integridad.

7.2 Términos y Definiciones

Indicación. Es una posible desviación respecto a la sanidad del material ó soldadura en un ducto. Las indicaciones pueden ser determinadas mediante examinación no-destructiva, como la inspección interna con equipo instrumentado.

Defecto. Es una imperfección que puede causar una falla ó condición inadecuada. Los defectos en los ductos deben ser analizados mediante un procedimiento de ingeniería aprobado (e.g. ASME B31G). Con base en los requerimientos de operación prescritos, los análisis determinarán si el defecto es suficientemente severo para requerir remoción ó reparación. Ejemplos de defectos son: Abolladuras, pérdida de material por corrosión, y grietas.

7.3 Descubrimiento de una Indicación

El descubrimiento o hallazgo de una indicación ocurre cuándo se tiene información adecuada acerca de una indicación, para determinar que la indicación representa una amenaza potencial para la integridad del segmento de ducto. Dependiendo del método de evaluación de integridad, se utilizarán los siguientes lineamientos para establecer el tiempo de descubrimiento de una indicación para propósitos de programación priorizada de valoración y corrección-reparación.

Para Prueba de Presión, la fecha del descubrimiento de una indicación ocurre típicamente durante la prueba, cuando una sección de ducto ó un accesorio falla. El defecto causante de la falla será reparado apropiadamente y la prueba continuará. Debido a la limitada información obtenida durante este

tipo de evaluación, típicamente, la revisión de la prueba es también limitada y no hay valoración subsecuente ni programa de corrección-reparación.

Para Evaluación Directa, la fecha de descubrimiento de un defecto será la fecha de cuando se realice la excavación para la examinación directa. Dependiendo de la indicación, se realizará la corrección-reparación apropiada. Típicamente, el método de evaluación directa ofrece la oportunidad de realizar reparaciones inmediatas y/o correcciones al momento del descubrimiento de la indicación. Sin embargo, después de la examinación directa, y dependiendo de la clasificación del defecto encontrado, cuando las reparaciones / correcciones no se realicen en ese momento, se documentará un programa priorizado de reparación-corrección con base en la fecha de la excavación para la examinación directa.

Para Inspección Interna, La fecha de descubrimiento de indicaciones no es similar a las fechas de descubrimiento de indicaciones para Prueba de Presión ó evaluación directa. Típicamente, cuando se usa un método ILI para evaluación, el descubrimiento de una indicación puede ocurrir durante:

- La excavación confirmatoria al recibo del reporte preliminar de inspección interna ILI
- La recopilación e integración de información de otras inspecciones indirectas, ó valoraciones periódicas, excavaciones de defectos, ó
- Cuando se recibe el reporte final de inspección ILI

Los siguientes lineamientos se consultarán, y usarán según sea apropiado, para propósitos de establecer una fecha de descubrimiento de una indicación particular identificada durante la revisión de datos proporcionados por la herramienta de inspección interna.

Reporte preliminar ó datos iniciales de inspección interna

Debido a que típicamente los datos preliminares de inspección interna no están sujetos al mismo nivel riguroso de aseguramiento de calidad que los reportes finales, los defectos identificados a partir de datos preliminares se tratan como preliminares hasta que se hayan verificado visualmente, o por otros medios apropiados. La verificación se programará tan pronto como sea practicable, sin embargo, los defectos preliminares identificados como "Indicaciones de Reparación Inmediata" de acuerdo con el párrafo 7.4.1 serán atendidas en forma rápida, incluyendo la reducción temporal de la presión de operación del ducto a una presión segura, de acuerdo con la última edición del "Manual para Determinar la Resistencia Remanente en Ductos con Corrosión" ASME/ANSI B31G, ó reducir la presión de operación a un nivel que no exceda el 80% del nivel de presión al momento en que se descubrió la indicación. Esta reducción temporal se mantendrá hasta el momento en que se pueda hacer la excavación para verificar la presencia del defecto bajo sospecha. Por la tanto, para defectos identificados en los datos preliminares, la fecha de

descubrimiento será la fecha en que el defecto es verificado mediante la excavación.

Reporte Final

La fecha de descubrimiento de indicaciones no podrá ser después de 180 días de terminada la evaluación, a menos que se justifique en forma documentada que el periodo de 180 días es impracticable. El GPAID es responsable de la coordinación con el proveedor del servicio ILI, y se asegurará que el reporte sea emitido no después de 180 días de se haya terminado la evaluación de la integridad.

7.4 Programa para Valoración y Corrección-Reparación

La valoración y corrección-reparación se basará en la evaluación de riesgos y en la severidad de los resultados de evaluación de integridad. El GPAID documentará e implementará un programa priorizado para corrección-reparación de las indicaciones que pudieran afectar la integridad del ducto. Dependiendo de la indicación específica encontrada, la corrección-reparación se realizará de acuerdo con lo siguiente:

- **Inmediata** – Cuando la condición del defecto muestre que es un punto de falla.
- **En un plazo de 60 días** – Cuando la condición del defecto muestre que es importante pero no es un punto de falla.
- **En un plazo de 180 días** – Cuando la condición del defecto se determina que es menos importante que el criterio de 60 días. Monitoreo – Cuando la condición del defecto muestra que no fallará antes de la próxima inspección Las condiciones para cada una de estas valoraciones y plazos para corrección-reparación se enlistan abajo. En caso de que haya demoras en la implementación de los plazos, el GPAID documentará las razones de demora en la valoración y corrección-reparación de las indicaciones encontradas y las entregará a la SEDE. La SEDE tomará las acciones apropiadas para salvaguardar la integridad del ducto recomendando la reducción de la máxima presión de operación hasta que la corrección-reparación sea realizada. Cuando se haga una reducción temporal en la presión máxima de operación esta no excederá de 365 días sin que se tome una acción posterior de corrección-reparación para garantizar la seguridad del segmento de ducto.

7.4.1 Condiciones de Reparación Inmediata

Cualquier indicación que caiga bajo esta categoría será examinada dentro de un plazo de 5 días a partir de su descubrimiento, y se tomarán las acciones apropiadas para salvaguardar la integridad del ducto. Para garantizar la continua operación segura del ducto, el GPAID con autorización de la SEDE, realizará acción de mitigación mediante la reducción temporal de la presión

máxima de operación hasta que las indicaciones o defectos listados abajo sean reparados. La reducción de la presión máxima de operación se calculará usando la formula indicada en la última edición del "Manual para Determinar la Resistencia Remanente en Ductos con Corrosión" ASME/ANSI B31G, ó reducir la presión de operación a un nivel que no exceda el 80% del nivel de presión al momento en que se descubrió la indicación.

Las siguientes indicaciones valoradas deben ser tratadas como reparación inmediata:

- La pérdida de metal mayor que 80 % del espesor nominal independientemente de las dimensiones. Como guía, se indican los valores correspondientes al 20% de espesor remanente para varios espesores de pared de tubo. Valores de espesor de pared remanente inferiores al 20% indicado abajo serán tratados como "indicaciones de reparación inmediata"
- Los cálculos de la resistencia remanente del tubo muestren una presión de ruptura pronóstico menor que la presión máxima de operación en la ubicación del defecto. El método apropiado para calcular la resistencia remanente será la última edición del "Manual para Determinar la Resistencia Remanente en Ductos con Corrosión" ASME/ANSI B31G.
- Cualquier pérdida de metal localizada en un cordón de soldadura longitudinal soldado por resistencia eléctrica (ERW) de corriente directa ó baja frecuencia, o por soldadura a tope mediante calentamiento de bordes (Electric Flash).
- Todas las indicaciones de agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (SCC)
- Una abolladura que tenga cualquier indicación de pérdida de metal, fractura, o concentración de esfuerzos.
- Una abolladura ubicada sobre la parte superior del gasoducto (entre las posiciones 4 y 8 de las manecillas del reloj) con una profundidad mayor que el 6% del diámetro nominal del tubo, y que no tenga indicación de pérdida de metal, fractura, o concentración de esfuerzos.
- Un defecto que a juicio del GPAID requiera de acción inmediata.

7.4.2 Condiciones de Reparación de 60-Días

Son indicaciones diferentes a las listadas como "Condiciones de Reparación Inmediata" en el párrafo 7.4.1. El GPAID programará dentro de un plazo de 60 días contados a partir del descubrimiento de la condición, la valoración y corrección-reparación de las indicaciones siguientes:

- Una abolladura ubicada sobre la parte superior del gasoducto (entre las manecillas 4 y 8 del reloj) con una profundidad mayor a 3 % del diámetro nominal del ducto.
- Una abolladura localizada en la parte baja del ducto, que tenga alguna indicación de pérdida de metal, agrietamiento o concentración de esfuerzos.

7.4.3 Condiciones de Reparación de 180-Días

Son indicaciones diferentes a las listadas como "Condiciones de Reparación Inmediata" en el párrafo 7.4.1, y a las "Condiciones de Reparación de 60 días" en el párrafo 7.4.2. El GPAID programará dentro de un plazo no mayor a 180 días contados a partir del descubrimiento de la condición, la valoración y corrección-reparación de las indicaciones siguientes:

- Una abolladura con una profundidad mayor al 2 % del diámetro del tubo del ducto que afecte la curvatura del ducto en una soldadura circunferencial o en un cordón de una soldadura longitudinal.
- Una abolladura ubicada en la parte superior del ducto (entre las posiciones 4 y 8 de las manecillas del reloj) con una profundidad mayor a 2 % del diámetro del tubo.
- Una abolladura ubicada en la parte inferior del ducto con una profundidad mayor al 6 % del diámetro del ducto.
- Los cálculos de la resistencia remanente del tubo muestren una presión de operación menor que la presión máxima de operación en la ubicación del defecto. El método apropiado para calcular la resistencia remanente incluye pero no está limitado a ASME/ANSI B31G.
- Un área de corrosión general con una pérdida de metal pronosticada mayor del 50 % del espesor de pared del tubo.
- Pronóstico de pérdida de metal mayor al 50 % del espesor nominal de pared localizado en un cruce con otro ducto, está en una área con Corrosión circunferencial extendida, o en un área con corrosión circunferencial. expandida, ó en un área que puede afectar una soldadura circunferencial. Los valores inferiores al 50% deben ser tratados como condiciones de reparación de 180 días.
- Una indicación de grieta potencial que cuando se excava se determina que es una grieta
- Corrosión existente en o a lo largo de una costura longitudinal de soldadura.
- Una rasgadura o ranura con profundidad mayor al 12.5 % del espesor de pared.

7.4.4 Otras condiciones de reparación

Además de las indicaciones descritas anteriormente en las secciones de "Reparación Inmediata", "Reparación de 60 días", "o Reparación de 180 días" el GPAID valorará y monitoreará cualquier otra indicación identificada por medio de una evaluación de integridad ó análisis de información, que pudiera poner en riesgo la integridad del ducto, y programar la según sea apropiado, la valoración y corrección-reparación de la indicación. Todas las otras indicaciones serán examinadas en la siguiente evaluación programada.

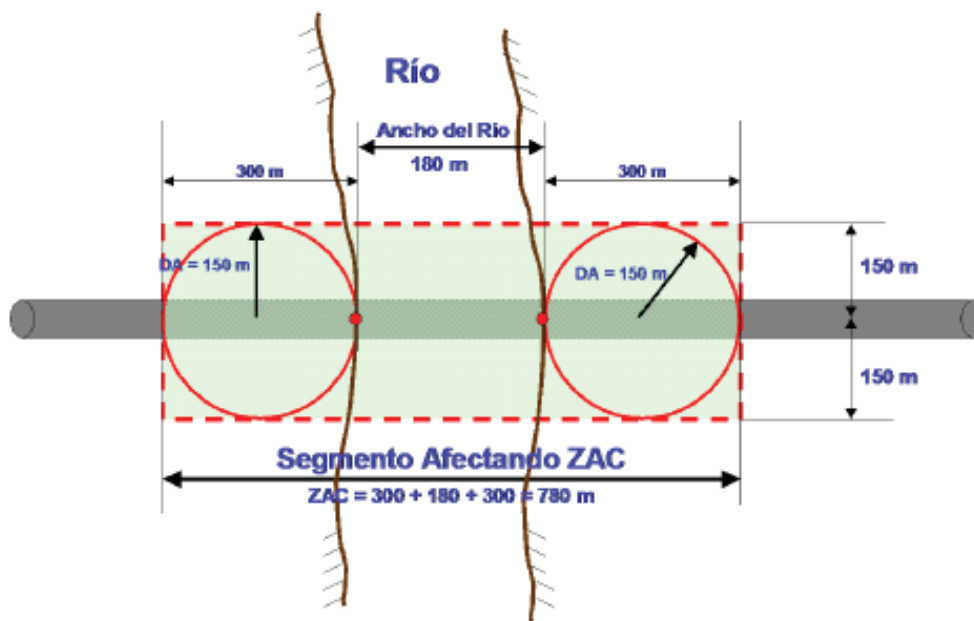
Anexo 2

PAID Apéndice A3. Ejemplos de Identificación de Zonas de Alta Consecuencia

Ductos que Transportan Hidrocarburos Líquidos; Ducto que cruza perpendicularmente un Río

Ejemplo:

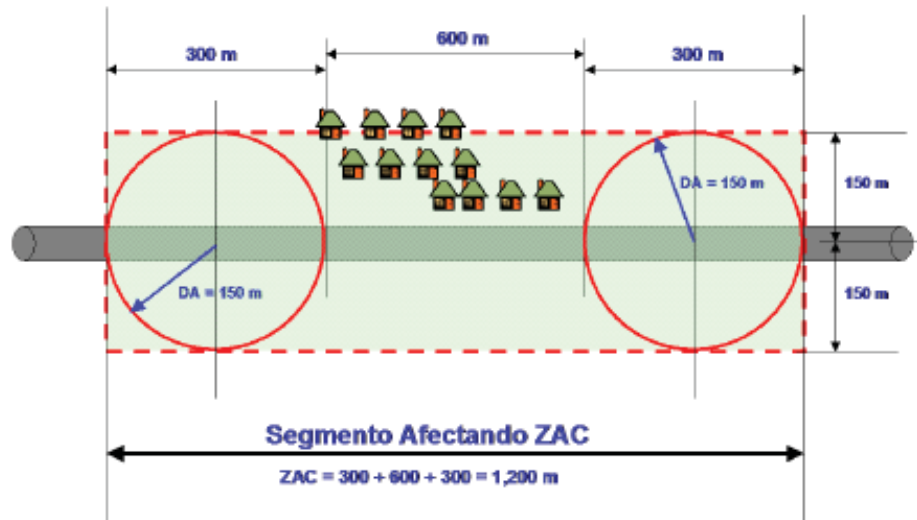
- Distancia de Afectación (Hazard Distance) calculada por PIRAMID para el caso más extenso; $DA = 150$ m
- Ancho del Río en la zona de cruce = 180 m
- Longitud del Segmento afectando ZAC = $300 + 180 + 300 = 780$ m



Ductos que Transportan Hidrocarburos Líquidos; Zonas Pobladas

Ejemplo:

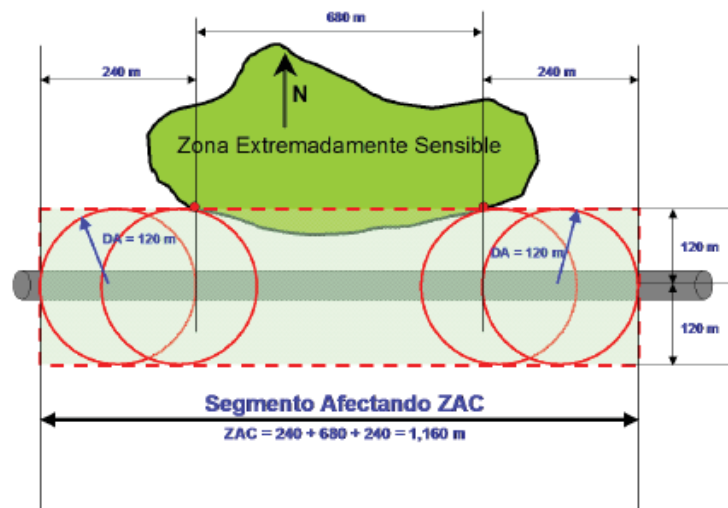
- Zona poblada a lo largo del ducto con una extensión de 600 m
- Distancia de Afectación (Hazard Distance) calculada por PIRAMID para el caso más extenso; $DA = 150$ m
- Longitud del Segmento afectando ZAC = $300 + 600 + 300 = 1,200$ m
- Longitud del Segmento afectando ZAC = $300 + 600 + 300 = 1,200$ m



Ductos que Transportan Hidrocarburos Líquidos; Zonas Extremadamente Sensibles

Ejemplo:

- Zona Extremadamente Sensible cuyos límites en la parte sur caen dentro de la Zona de afectación de un ducto
- Distancia de Afectación (Hazard Distance) calculada por PIRAMID para el caso más extenso; $DA = 120$ m
- Longitud de la zona afectada = 680 m
- Longitud del Segmento afectando ZAC = $240 + 680 + 240 = 1,160$ m



Ductos para Transporte de Hidrocarburos Gaseosos; Localizaciones Clase 3 ó 4

Ejemplo:

- Localización clase 3 ó 4

